

Repotenciación y optimización de un separador ciclónico para el proceso de recuperación de pintura en polvo en INSELEC Cía. Ltda.

Bazurto Suntaxi, Eduardo David y Naranjo Guamán, Jerson David

Departamento de Ciencia de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

MSc. Calvopiña Enriquez, Héctor Alejandro

31 de julio de 2026

Certificado de análisis
Compilatio Magister+ | ESPE-ECU

TRABAJO-DE-TITULACION-BAZURTO-NARANJO
ID : 0337cca0774d507ea49df9b8e419ff716483542a

9%
Textos sospechosos

Nombre del fichero : TRABAJO-DE-TITULACION-BAZURTO-NARANJO .txt
Tamaño del archivo original : 3,28 MB
Número de palabras : 21.739

Depositante : HECTOR ALEJANDRO CALVOPIÑA ENRIQUEZ
Fecha de depósito : 31 de julio de 2026
Tipo de carga : interface
fecha de fin de análisis : 31 de julio de 2026

Resumen (sección 1/2)

Localización de los textos sospechosos en el documento :



Incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Similitudes <1%

Pasajes con similitudes a fuentes encontradas en diferentes colecciones.



Detección de IA 9%

Textos estilísticamente próximos a un texto generado por una IA.
Este índice es un indicador y no una prueba. Comprueba con el autor si domina los conocimientos mencionados en el documento.



Idiomas no reconocidos 2%

Pasajes en los que parte del vocabulario utilizado no forma parte del diccionario de la lengua.
Puede tratarse de un intento del autor de modificar el texto para evitar ser detectado.



No incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Textos entre comillas <1%

Pasajes entre comillas, a menudo indicativos de una cita.

HECTOR ALEJANDRO CALVOPINA ENRIQUEZ

Firmado digitalmente por HECTOR ALEJANDRO CALVOPINA ENRIQUEZ
Fecha: 2026.09.03 09:34:48 -05'00'

MSc. Calvopiña Enriquez, Héctor Alejandro

Director/a

Departamento de Ciencia de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: "**Repotenciación y optimización de un separador ciclónico para el proceso de recuperación de pintura en polvo en INSELEC Cia. Ltda.**" fue realizado por los señores **Bazurto Suntaxi, Eduardo David y Naranjo Guamán, Jerson David,** el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE; habiéndose efectuado una revisión integral de forma y de fondo conforme a los lineamientos y formatos institucionales vigentes. Además, fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 31 de julio de 2026

HECTOR ALEJANDRO CALVOPINA ENRIQUEZ

Firmado digitalmente por HECTOR ALEJANDRO CALVOPINA ENRIQUEZ
Fecha: 2026.09.03 09:35:12 -05'00'

MSc. Calvopiña Enriquez, Héctor Alejandro

Director

C.C.: 1726764408

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Bazurto Suntaxi, Eduardo David y Naranjo Guamán, Jerson David**, con cédulas de ciudadanía n° 1726764408 y n° 1753877578, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular**: Repotenciación y optimización de un separador ciclónico para el proceso de recuperación de pintura en polvo en INSELEC Cia. Ltda.** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 31 de julio de 2026

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
EDUARDO DAVID
BAZURTO SUNTAXI

Bazurto Suntaxi, Eduardo David

C.C.: 1726764408

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
JERSON DAVID
NARANJO GUAMAN

Naranjo Guamán, Jerson David

C.C.: 1753877578

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Autorización de Publicación

Nosotros, **Bazurto Suntaxi, Eduardo David y Naranjo Guamán, Jerson David**, con cédulas de ciudadanía n° 1726764408 y n° 1753877578, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Repotenciación y optimización de un separador ciclónico para el proceso de recuperación de pintura en polvo en INSELEC Cia. Ltda.** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 31 de julio de 2026

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
EDUARDO DAVID
BAZURTO SUNTAXI

Bazurto Suntaxi, Eduardo David

C.C.: 1726764408

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
JERSON DAVID
NARANJO GUAMAN

Naranjo Guamán, Jerson David

C.C.: 1753877578

Dedicatoria

Dedico este trabajo de titulación, en primer lugar, a mis padres, Darwin y Rocío, quienes con su amor incondicional, esfuerzo y sabios consejos han sido el pilar fundamental de mi vida. Gracias por creer en mí y por darme las herramientas para alcanzar este sueño.

A mis hermanas, Kimberlly y Guadalupe, por su compañía, paciencia y por ser mi motivación constante para ser un mejor profesional y persona cada día. Este logro es el reflejo de todo lo que me han enseñado y se los dedico con todo mi corazón.

A mis mascotas, Peluchín (+) y Modelon (+), a quienes llevo siempre en mis recuerdos con un cariño especial.

Finalmente, a mis abuelitos, que por supuesto no podían faltar en este reconocimiento; y a mis tíos: a Wilmer, por guiarme al mundo del deporte y mostrarme una forma sana de canalizar el estrés, y a Betty y Naty, por todo el inmenso cariño que siempre me han demostrado.

Eduardo David Bazurto Suntaxi

A Dios, por el don de la vida, por la fortaleza en los días inciertos y por la sabiduría que iluminó este camino hasta su término.

A mis padres, Alberto y María, por ser mi refugio incondicional, mi guía y mi mayor respaldo. Soy afortunado de ser su hijo; gracias por su amor, su paciencia infinita y la tranquilidad que me brindan constantemente.

A mis hermanos, Kevin y Maribel, por estar siempre a mi lado, por su apoyo constante y por compartir conmigo cada etapa y desafío de esta odisea.

A los amigos que la vida puso en mi camino durante la carrera, por convertir estos años en una etapa inolvidable. Espero conservar siempre su amistad, pues llevaré sus nombres escritos en la tabla de mi corazón.

Jerson David Naranjo Guamán

Agradecimiento

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por el rigor académico y por haberme brindado las herramientas necesarias para alcanzar esta meta profesional en el campo de la Mecatrónica.

Quiero dejar constancia de mi profundo agradecimiento a INSELEC Cía. Ltda., y en particular al Ing. Ramiro Amores y al Ing. Jonathan Andrade, por su excelente apertura, supervisión y apoyo constante durante la ejecución de las actividades en planta. Su respaldo técnico fue clave para la materialización de esta tesis.

Al Magíster Héctor Calvopiña, tutor de tesis, por su invaluable guía y por habernos acompañado en cada etapa de este camino.

Al Ing. José Luis Erazo, por haberme brindado su orientación y experiencia para realizar de manera adecuada las simulaciones de este proyecto.

A mi compañero de proyecto, Jerson David Naranjo Guamán, por el excelente trabajo en equipo y el compañerismo demostrado durante todo este tiempo.

A mi familia, por su amor, motivación y sacrificios, que me han permitido llegar hasta aquí. Este logro también es suyo.

Eduardo David Bazurto Suntaxi

Agradezco a Dios, por poner en mi camino las oportunidades, los medios y la constancia necesarios para culminar con bien esta etapa de formación.

A la empresa INSELEC Cía. Ltda. por abrirnos sus instalaciones y facilitarnos las condiciones para la realización de esta tesis.

Al Laboratorio de Reología y Fluidos Complejos, por facilitarnos sus instalaciones, equipos y soporte técnico para la realización de la caracterización granulométrica.

A mi director de tesis, Ing. Héctor Alejandro Calvopiña Enríquez, Mgtr., por su guía, criterio académico y acompañamiento en el transcurso de este proyecto.

A mi compañero Eduardo Bazurto por su valiosa amistad, constante compromiso y trabajo en equipo compartido en cada etapa del proceso.

Jerson David Naranjo Guamán

Índice de contenidos

Dedicatoria 6

Agradecimiento 8

Capítulo I: Generalidades 19

Antecedentes 19

Justificación e importancia 20

Alcance y limitaciones del proyecto 22

Objetivos 24

- Objetivos Generales 24
- Objetivos Específicos 24

Capítulo II: Estado del Arte 25

Concepto y fundamento de separadores ciclónicos 25

- Principio de funcionamiento 25
- Mecanismos de recolección de partículas. 26
- Variables geométricas y operativas. 29

Modelos de flujo multifásico gas–sólido 33

Parámetros de desempeño 35

- Eficiencia de separación 35
- Proporciones geométricas y su influencia 35

Capítulo III: Diagnóstico, diseño y optimización del separador ciclónico 38

Revisión técnica y análisis del diseño existente 38

- Levantamiento dimensional y reconstrucción del modelo CAD 38
- Evaluación de las proporciones geométricas 39

Criterios de evaluación para optimización del separador ciclónico 41

Simulación computacional CFD 44
Definición de condiciones de frontera 44
Estudio de independencia de malla 48
Velocidad de las partículas de entrada 53
Cálculo de la velocidad óptima 53
Análisis de sensibilidad frente a variaciones de velocidad 56
Propuesta de mejora 63
Diseño de soportes para tubos Pitot 64
Diseño del sistema de instrumentación y acondicionamiento de señal 65
Integración de sensores 68
Plan de intervención y jerarquización de mejoras 70
Capítulo IV: Implementación y validación experimental 72
Selección de los componentes 72
Selección del variador de frecuencia (VDF) 72
Dimensionamiento de contactor 74
Dimensionamiento de protecciones 75
Dimensionamiento de los conductores 79
Diagrama Unifilar del Circuito de Potencia 80
Dimensionamiento de la envolvente 82
Pruebas experimentales 89
Análisis de datos 90
Implementación de visión artificial 91
Resultados de la distribución granulométrica 95
Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones 101
Conclusiones 101
Recomendaciones para futuras mejoras y estudios 102

Propuestas para trabajos futuros 103

Referencias 105

Apéndices 107

Índice de tablas

Tabla 1 Resumen de los equipos de recolección de partículas 27

Tabla 2 Resumen de los equipos de recolección de partículas 30

Tabla 3 Variables del modelo para calcular la velocidad de entrada de máxima eficiencia 31

Tabla 4 Parámetros de Sutherland para diversos gases 32

Tabla 5 Descripción de los modelos de simulación bajo el enfoque Euler-Lagrange para flujos multifásicos gas-sólido..... 33

Tabla 6 Nomenclatura y mediciones del separador ciclónico (INSELEC Cía. Ltda.) 38

Tabla 7 Relaciones geométricas del separador ciclónico analizado. 40

Tabla 8 Resumen de las condiciones de frontera y parámetros de simulación implementados en Ansys Fluent. 47

Tabla 9 Variables paramétricas de diseño y evaluación para la discretización del dominio computacional 50

Tabla 10 Valores de entrada para el modelo de la velocidad óptima de máxima eficiencia 55

Tabla 11 Variación de los contornos de presión y velocidad direccional en función de la velocidad de entrada. 56

Tabla 12 Comportamiento comparativo de los perfiles de velocidad frente a la variación en la velocidad de entrada 60

Tabla 13 Especificaciones del motor MAL-38F2653-2..... 72

Tabla 14 Especificaciones del VFD Altivar ATV630D11M3 73

Tabla 15 Especificaciones del Contactor Tesys D - 3P(3 NA) - AC-3 - <= 440 V 25 A - 220 V CA bobina 74

Tabla 16 Corriente a plena carga de motores trifásicos de corriente alterna 75

Tabla 17 Ajuste máximo de los dispositivos de protección contra cortocircuitos y falla a tierra para circuitos derivados de motores 77

Tabla 18 Especificaciones del ComPacT NSX400F MicroLogic 1,3 M 320 A 3 P 3D..... 78

Tabla 19 Ampacidades de conductores aislados con no más de tres conductores portadores de corriente en canal, cable o tierra 79

Tabla 20 Dimensiones físicas y disipación térmica de los equipos 82

Tabla 21 Condiciones del sitio de instalación de la envolvente y su implicación en el diseño . 83

Tabla 22 Espacios mínimos de montaje considerados 86

Tabla 23 Comparativa de los requerimientos calculados frente al Gabinete NSYSFN20650P88

Tabla 24 Especificaciones y criterios de selección del climatizador NSYCU800DG 89

Tabla 25 Velocidad del flujo de aire en la entrada del ciclón en función de la frecuencia del VDF. 90

Tabla 26 Comparativa de los percentiles volumétricos antes y después de la repotenciación. 100

Índice de figuras

Figura 1 Representación de los vórtices dentro del separador ciclónico 25

Figura 2 Representación de los mecanismos de recolección de partículas por (A) Impacto inercial, (B) intercepción directa, (C) deposición por difusión. 27

Figura 3 Parámetros geométricos de un separador ciclónico 29

Figura 4 Resumen de los enfoques de modelado para simulación de flujo multifásico gas-sólido 34

Figura 5 Representación gráfica de las variables usadas 38

Figura 6 Modelo CAD, en base a las medidas del separador ciclónico en INSELEC Cía. Ltda. 39

Figura 7 Caracterización microscópica: a) polvo de pintura virgen de referencia; b) material particulado de desecho emitido por el conducto localizador de vórtice. 43

Figura 8 Zonas de refinamiento de malla en la geometría del separador ciclónico 49

Figura 9 Identificación de las superficies usadas en la simulación 50

Figura 10 Representación gráfica de los parámetros de entrada y salida para el estudio de independencia de malla 51

Figura 11 Visualización del mallado poliédrico final de 6 mm en las distintas secciones del separador 52

Figura 12 Representación geométrica de la línea de extracción de datos para los perfiles de velocidad 60

Figura 13 Visualización de las líneas de trayectoria de la fase discreta en la entrada del ciclón 63

Figura 14 Diseño CAD del soporte estructural para la instrumentación del tubo Pitot. 64

Figura 15 Diseño CAD del elemento obturador para el sellado de las tomas de medición. 65

Figura 16 Diseño electrónico y de acondicionamiento de señal para el transductor MPXV5004DP 67

Figura 17 Vista tridimensional de la PCB para el sistema de instrumentación y acondicionamiento de señal 68

Figura 18 Esquema de localización de los tubos Pitot para la adquisición de datos de velocidad 69

Figura 19 Sondas Pitot instaladas junto con los soportes mecánicos desarrollados a) tubo de entrada y b) tubo buscador de vórtice 70

Figura 20 Variador de frecuencia Scheneider Altivar ATV630D11M3 73

Figura 21 Contactor Tesys D - 3P(3 NA) - AC-3 - <= 440 V 25 A - 220 V CA bobina 74

Figura 22 Interruptor Automático ComPacT NSX400F MicroLogic 1.3 M 320 A 3P 3D 78

Figura 23 Esquema unifilar de la etapa potencia y protecciones del sistema 81

Figura 24 PanelSeT SFN NSYSFN20650P 87

Figura 25 ClimaSys CU NSYCU800DG 88

Figura 26 Interfaz gráfica de usuario (GUI) desarrollada para la parametrización y análisis granulométrico 93

Figura 27 Ilustración del reporte estadístico que se genera automáticamente en formato PDF. 94

Figura 28 Reconocimiento de bordes y etiquetado dimensional en las micrografías de las muestras analizadas 95

Figura 29 Distribución granulométrica de la pintura nueva: a) frecuencia numérica de partículas y b) volumen porcentual 96

Figura 30 Caracterización granulométrica del desecho (pre-intervención): a) frecuencia numérica de partículas y b) volumen porcentual 97

Figura 31 Caracterización granulométrica del desecho (post-intervención): a) frecuencia numérica de partículas y b) volumen porcentual 98

Figura 32 Comparativa de la distribución granulométrica volumétrica entre la pintura virgen y el desecho (pre y post intervención) 99

Resumen

Este trabajo de titulación documenta la repotenciación de un separador ciclónico encargado de recuperar pintura en polvo dentro de una planta industrial. El objetivo central de la intervención fue frenar la fuga constante de materia prima útil que terminaba desperdiciada en el depósito de rechazo. Para abordar el problema aplicando los fundamentos de la ingeniería mecatrónica, partimos de un diagnóstico aerodinámico utilizando simulaciones numéricas (CFD). Este análisis nos permitió mapear los cuellos de botella cinemáticos del equipo y calcular la velocidad de inyección exacta para maximizar la fuerza centrífuga de separación.

Teníamos una regla estricta durante la ejecución, intervenir la línea de producción lo menos posible. Por ello, la mejora física se enfocó en acoplar un mecanismo de control de potencia al ventilador principal del separador ciclónico. De este modo, logramos subir la velocidad base del aire hasta un nivel operativo óptimo, protegiendo en todo momento la integridad térmica del motor. Por otro lado, hacer las mediciones de las micrografías a mano traía demasiados sesgos. Para comprobar empíricamente que el arreglo funcionaba, programamos un algoritmo de visión artificial. Este software automatizó el conteo y la medición del polvo analizando directamente la morfología de las partículas en las micrografías obtenidas del laboratorio.

Los números finales respaldaron el rediseño aerodinámico. El volumen de las partículas finas purgadas en el desecho creció con fuerza, pasando de una concentración del 17.99% al 43.66%. A la par, el tamaño máximo de la pintura fugitiva se encogió drásticamente, atrapando material de hasta el rango de los 60 a 70 micrómetros. Al revisar los percentiles volumétricos, confirmamos que los diámetros de corte se desplomaron; de hecho, la mediana poblacional del polvo se estabilizó en 21.45 micrómetros. En definitiva, este ajuste a los parámetros del sistema probó ser capaz de retener un porcentaje sustancial de pintura útil, optimizando económica y ambientalmente todo el proceso de recubrimiento electrostático de la empresa.

Palabras clave: separador ciclónico, visión artificial, Dinámica De Fluidos Computacional CFD, pintura en polvo

Abstract

This work documents the repowering of a cyclone separator responsible for recovering powder coating inside an industrial plant. The main goal of this intervention was to stop the constant leak of useful raw material that ended up wasted in the rejection bin. To tackle the problem using mechatronics engineering fundamentals, we started with an aerodynamic diagnosis using numerical simulations. This virtual analysis allowed us to map the equipment's kinematic bottlenecks and calculate the exact injection velocity to maximize the centrifugal separation force.

We had one strict rule during execution: to interfere with the production line as little as possible. Therefore, the physical improvement focused on coupling a power control mechanism to the factory's main exhaust fan. By doing this, we managed to raise the base airflow velocity to an optimal operational level while always protecting the motor’s thermal integrity. On the other hand, taking manual control measurements introduced too many biases. To empirically prove that the setup worked, we programmed a computer vision algorithm. This software automated the dust counting and measurement by directly analyzing the particle morphology from the micrographs obtained in the lab.

The final numbers backed up the aerodynamic redesign. The volume of fine particles purged into the waste bin grew strongly, jumping from 17.99% to 43.66% concentration. At the same time, the maximum size of the fugitive paint shrank drastically, trapping only material in the 60 to 70-micrometer range. When checking the volumetric percentiles, we confirmed that the cut diameters plummeted; in fact, the dust's population median stabilized at 21.45 micrometers. Ultimately, this parameter adjustment proved capable of retaining a substantial percentage of useful paint, economically and environmentally optimizing the company's entire electrostatic coating process.

Keywords: cyclone separator, computer vision, Computational Fluid Dynamics CFD, powder coating

Capítulo I: Generalidades

Antecedentes

Los procesos de recubrimiento industrial exigen sistemas de recolección cada vez más eficientes con el fin de recuperar y reutilizar la materia prima. Para cumplir con esta tarea, los separadores ciclónicos son los equipos más utilizados en la industria, gracias a su bajo costo de instalación, alta resistencia mecánica y facilidad de mantenimiento.

El rendimiento de estos equipos depende de relaciones geométricas muy específicas como las proporciones entre la boca de entrada, el cuerpo cilíndrico y la zona de descarga. Y de variables operativas, siendo la velocidad de ingreso del aire la más crítica. Estos factores controlan directamente qué tanta pintura se logra atrapar y cuánta presión pierde el sistema. Por ende, ajustar estos parámetros es la vía principal para que el ciclón responda a las necesidades exactas de la planta.

En el caso específico de INSELEC Cía. Ltda., planta ubicada en el Parque Industrial de Itulcachi a 2650 metros de altitud, el proceso de pintura electrostática depende completamente de uno de estos separadores. Durante la aplicación, una gran porción del polvo de pintura no se adhiere a las piezas metálicas y queda suspendida en el ambiente. Toda esta nube de material, compuesta por partículas de diversos tamaños, es succionada hacia el ciclón. Puesto que el reciclaje de la pintura solo es rentable si el equipo logra retener las partículas de mayor tamaño y útiles, el comportamiento aerodinámico actual del separador es el factor crítico que define la eficiencia de toda la línea de producción.

Justificación e importancia

El problema central en la línea de recubrimiento electrostático de INSELEC Cía. Ltda. es el desperdicio continuo de materia prima. Debido a la deficiencia actual en la separación, una cantidad considerable de pintura útil termina en la tolva de desperdicios, inflando directamente los costos de operación. El objetivo de repotenciar el equipo es mejorar la reutilización de partículas gruesas para lo cual definimos un diámetro de corte. Este parámetro representa el tamaño límite de partícula, permite clasificar y retener las partículas gruesas que sí son reutilizables, mientras elimina de forma exclusiva el polvo fino inservible. En la práctica industrial, es preferible que una fracción mínima y controlada de polvo fino regrese al ciclo de pintado antes que seguir perdiendo material grueso de alto valor.

Mirando el panorama nacional, gran parte de la industria ecuatoriana opera con maquinaria adaptada a prueba y error, quedando rezagada frente a los estándares de eficiencia actuales. En la práctica, la meta de este proyecto es cambiar esa situación. Como la pintura en polvo es un insumo que mayormente se importa, lograr recuperar una mayor cantidad hace que la planta dependa menos del exterior, lo que al final reduce los costos y mejora la competitividad de la empresa. Por el lado ambiental, el beneficio de esta optimización es directo. Al hacer que el ciclón sea más selectivo, evitamos enviar volúmenes enormes de micropartículas al tacho de basura, ahorrándole a la fábrica el problema de tener que gestionar y confinar todo ese polvo como desecho industrial peligroso.

Visto desde nuestra formación profesional, el proyecto deja claro que ya no basta con alterar la maquinaria de manera empírica, se necesitan herramientas de ingeniería precisas. Para mejorar este equipo tuvimos que combinar varias ramas: usamos diseño asistido por computadora (CAD) para la estructura, simulación avanzada (CAE) para el análisis y fundamentos de control automático. De hecho, simular el comportamiento del flujo multifásico mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) fue la pieza clave. Sin esa base virtual, no habríamos sabido exactamente de qué manera intervenir los conductos físicos de la planta, ni

de qué capacidad debían ser los componentes de potencia para que el equipo funcionara de forma segura. Con esto, garantizamos una optimización segura que no detuvo la producción de la máquina. Esta combinación de modelado virtual con la posterior intervención física y ajuste de parámetros (como la caída de presión y la velocidad de entrada) refleja la esencia práctica de la mecatrónica: unir mecánica, computación y control para resolver problemas reales en la planta.

Alcance y limitaciones del proyecto

El presente trabajo de titulación define como alcance principal la repotenciación y optimización de un separador ciclónico empleado en el proceso de recuperación de pintura en polvo dentro de la planta industrial de INSELEC Cía. Ltda. Para ello, el proyecto abarca inicialmente una fase de investigación y diagnóstico que incluye el levantamiento técnico del equipo instalado, el análisis de sus parámetros geométricos y operativos, y la evaluación de su desempeño actual. A partir del estado del arte, se establecerán los criterios y las variables críticas que rigen la pérdida de carga y la eficiencia de recolección del material particulado.

Como directriz operativa fundamental, establecida a partir de la coordinación técnica con la gerencia y el departamento de mantenimiento de la empresa, se sugirió que el diseño se enfocará en un diámetro de crítico de 20 μm para la separación de partículas. Bajo este parámetro, las partículas con un diámetro inferior se clasificarán como polvo fino destinado al desecho, mientras que aquellas iguales o superiores a 20 μm corresponderán al material reutilizable. El principal criterio de optimización se enfocó en retener la mayor cantidad posible de pintura útil. Para lograrlo, el sistema debe asegurar que el flujo de desecho no arrastre partículas gruesas. Para poder logar lo previsto se planteó una concesión técnica, aceptar que una pequeña fracción de polvo fino se mezcle con el material recuperado. Lejos de ser un problema, esta presencia controlada imita bastante bien las propiedades y el comportamiento de la pintura virgen. A nivel industrial, esta decisión resulta mucho más rentable y lógica que seguir desperdiciando la sección de pintura en polvo útil.

Para garantizar esta separación exacta según el tamaño del polvo (clasificación granulométrica), el trabajo comenzó en el entorno virtual. Primero, levantamos las medidas y reconstruimos el ciclón en 3D mediante modelado CAD. Una vez definido el volumen geométrico, pasamos a evaluar el comportamiento del aire y las partículas ejecutando simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Mediante el uso de la herramienta de simulación avanzada como lo es *Ansys Fluent* y la aplicación de modelos de fase discreta

(DPM) para el flujo gas-sólido, se evaluarán los campos de velocidad, gradientes de presión y la trayectoria de las partículas. Con esta base computacional, se ejecutará un análisis paramétrico iterando tanto las dimensiones geométricas como la velocidad de inyección. El objetivo principal de esta evaluación paramétrica es mover la curva de eficiencia hasta alcanzar nuestro diámetro de corte deseado. Una vez validado experimentalmente este comportamiento, definimos la configuración mecánica final que tendrá el equipo o si se debe realizar alguna modificación extra.

Con la geometría y parámetros óptimos ya comprobados en el software, el siguiente paso abarca el diseño detallado de la instrumentación y la fabricación de los acoples mecánicos. Todo este esfuerzo culmina con el montaje físico de los componentes directamente en la línea de producción de INSELEC Cía. Ltda. Para cerrar esta etapa, validamos las mejoras de forma empírica en las propias instalaciones. Allí medimos la nueva eficiencia de separación, el volumen real de pintura que se dirige al depósito de desecho, comparando estos resultados cara a cara con el comportamiento que tenía el ciclón original.

Por el lado de las limitaciones, la ejecución del proyecto tiene restricciones operativas muy puntuales para no entorpecer los procesos diarios de la fábrica. Toda nuestra intervención se centra de forma exclusiva en el separador ciclónico, no se plantea rediseñar la cabina de pintura ni alterar los equipos periféricos.

Además, el rendimiento del equipo repotenciado se verifica mediante ensayos técnicos experimentales dentro de la misma planta, sin requerir certificaciones de medición de los parámetros deseados de laboratorios externos. Asimismo, el documento se enfoca puramente en el comportamiento de los fluidos y la viabilidad técnica de la mejora, por lo que quedan fuera del alcance las auditorías financieras o los estudios de rentabilidad comercial. Toda la fase de implementación y las mediciones de campo están supeditadas a no interrumpir los regímenes de producción diarios, respetando las limitaciones impuestas por la infraestructura eléctrica y los caudales neumáticos ya instalados.

Objetivos

Objetivos Generales

Repotenciar y optimizar un separador ciclónico para el proceso de recuperación de pintura en polvo en la empresa INSELEC Cía. Ltda.

Objetivos Específicos

Caracterizar el estado actual del separador ciclónico utilizado en el proceso de recuperación de pintura en polvo de la empresa INSELEC Cía. Ltda., mediante el análisis de sus parámetros geométricos, condiciones operativas y eficiencia de separación.

Desarrollar y validar un modelo CFD del separador ciclónico, que permita simular el comportamiento del flujo gas–sólido, la distribución de velocidades, pérdidas de carga y eficiencia de captura de partículas.

Evaluar la influencia de la variación de parámetros geométricos y operativos (diámetro del ciclón, longitud del *vortex finder*, diámetro de salida, velocidad de entrada, entre otros) sobre el desempeño del separador, a partir de simulaciones CFD comparativas.

Seleccionar la configuración óptima para la repotenciación del separador ciclónico, definiendo los componentes mecánicos y electrónicos necesarios, de acuerdo con los resultados del análisis CAD/CAE, CFD y los requerimientos operativos del proceso.

Implementar y validar la configuración seleccionada del separador ciclónico, y realizar una evaluación comparativa de su desempeño antes y después de la intervención, considerando parámetros como eficiencia de separación, pérdida de carga y recuperación de pintura en polvo.

Capítulo II: Estado del Arte

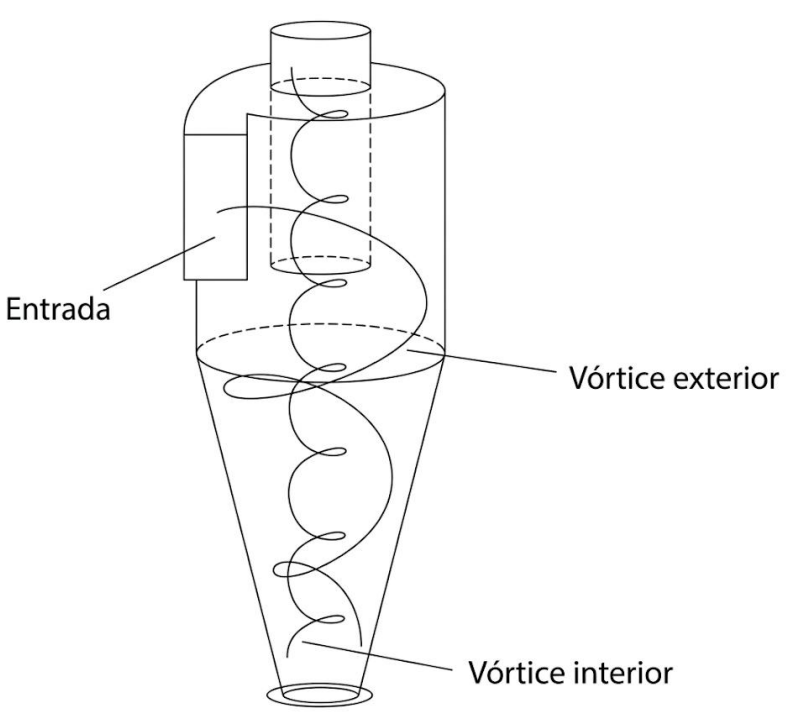
Concepto y fundamento de separadores ciclónicos

Principio de funcionamiento

La entrada tangencial permite que ingrese un flujo de aire y se dirija tangencialmente hacia el interior del ciclón, lo que resulta en la generación de un doble flujo giratorio. En la región exterior del remolino el gas presenta un flujo descendente denominado “vórtice externo”, mientras que en la región central se observa un flujo ascendente conocido como “vórtice interno”. Las partículas dentro de la corriente de gas polvoriento serán impulsadas hacia la pared del dispositivo como resultado de la fuerza centrífuga. Posteriormente, en conjunto con el flujo de aire cercano a la pared, serán trasportados hacia abajo hasta la sección de descarga de polvo.(C. Wang et al., 2023)

Figura 1

Representación de los vórtices dentro del separador ciclónico



Nota: Obtenido de (C. Wang et al., 2023)

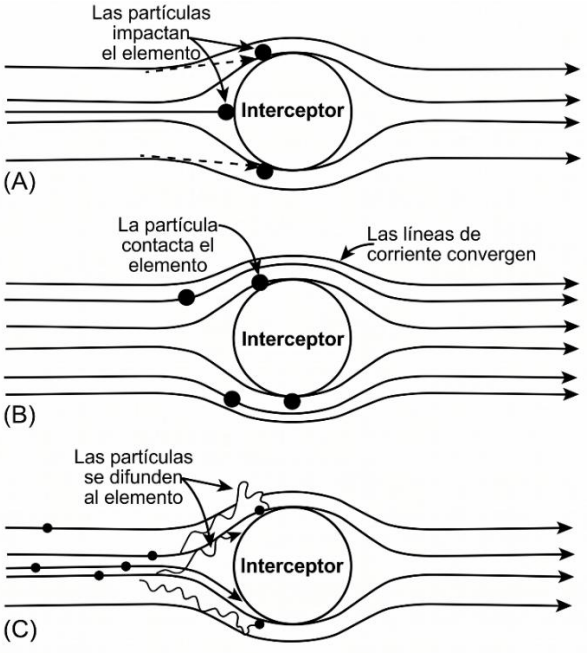
Mecanismos de recolección de partículas.

Según (Miller, 2017) los mecanismos utilizados para la recolección de partículas en flujos de gas pueden clasificarse en:

1. **Sedimentación por gravedad:** Emplea la gravedad para eliminar partículas dentro de una cámara de sedimentación.
2. **Impacto inercial:** Se da en partículas grandes debido a su inercia presentan colisiones con el interceptor mientras que las partículas más pequeñas permanecen en la corriente de gas.
3. **Intercepción directa:** Ocurre cuando algunas de las partículas más pequeñas hacen contacto con el interceptor en su punto de mayor proximidad.
4. **Deposición por difusión:** Las partículas generalmente menores a 0.3 μm impactan contra el colector como resultado del movimiento molecular aleatorio o difusión.
5. **Precipitación electrostática:** Se basa en la atracción mutua entre partículas de una carga eléctrica y un dispositivo de recolección de polaridad opuesta.
6. **Deposición térmica:** Es un factor menor en los equipos de recolección debido a que la fuerza termoforética es pequeña.
7. **Aglomeración:** Es un mecanismo donde el tamaño promedio de las partículas aumenta para mejorar la eficiencia de la recolección.

Figura 2

Representación de los mecanismos de recolección de partículas por (A) Impacto inercial, (B) intercepción directa, (C) deposición por difusión.



Nota: Obtenido de (Miller, 2017)

Dado que los equipos de recolección de partículas utilizan más de uno de los mecanismos de recolección es recomendable clasificar los equipos según su tipo en lugar de hacerlo por su mecanismo de recolección.

***Tabla* 1**

Resumen de los equipos de recolección de partículas

Dispositivo de control	Tamaño mínimo de partícula (μm)	Eficiencia (%, base de masa)	Ventajas	Desventajas
Separador Ciclónico	5–25	50–90	Simplicidad de diseño y mantenimiento Requiere poco espacio en el suelo Eliminación seca y continua de las partículas recolectadas	Requiere mucho espacio en altura. Baja eficiencia de recolección de partículas pequeñas. Sensible a cargas de polvo y caudales variables.

			Pérdida de presión de baja a moderada Maneja partículas grandes.	Problemas de corrosión y erosión. Costo adicional de tratamiento y recuperación de aguas residuales. Baja eficiencia en partículas submicrónicas.
Colectores húmedos Torres de aspersión Ciclónicos Venturi	>10 >2.5 >0.5	<80 <80 <80	Absorción de gases y eliminación de partículas simultáneas. Apto para procesar corrientes de gas a alta temperatura y con gran carga de humedad. Facilita la recuperación y neutralización de compuestos y nieblas corrosivas. Minimiza el riesgo de explosión por acumulación de polvo. La eficiencia puede variar.	Contaminación de la corriente del efluente por arrastre de líquido. Problemas de congelación en clima frío. Reducción de la flotabilidad y del ascenso del penacho. El vapor de agua contribuye a un penacho (pluma) visible.
Precipitador electrostático	<1	95–99	Eficiencia obtenible de más del 99%. Se pueden recoger partículas muy pequeñas. Las partículas pueden ser recogidas tanto en seco como en húmedo. Las pérdidas de carga y los requisitos de potencia son pequeños comparados con otros colectores de alta eficiencia.	Costo inicial relativamente alto. Sensibles a variaciones en la carga de polvo, caudales o resistividad. Se requieren precauciones para proteger al personal del alto voltaje. Las eficiencias de recolección pueden deteriorarse gradual e imperceptiblemente.
Filtración por tejido (Filtros de tela)	<1	>99	Posibilidad de recolección en seco. La disminución del rendimiento es notable (fácil de detectar). Posibilidad de recolección de partículas pequeñas. Posibilidad de alta eficiencia.	Sensibilidad a la velocidad de filtración. Los gases a alta temperatura deben enfriarse. Afectado por la humedad relativa (condensación). Susceptibilidad del tejido al ataque químico.

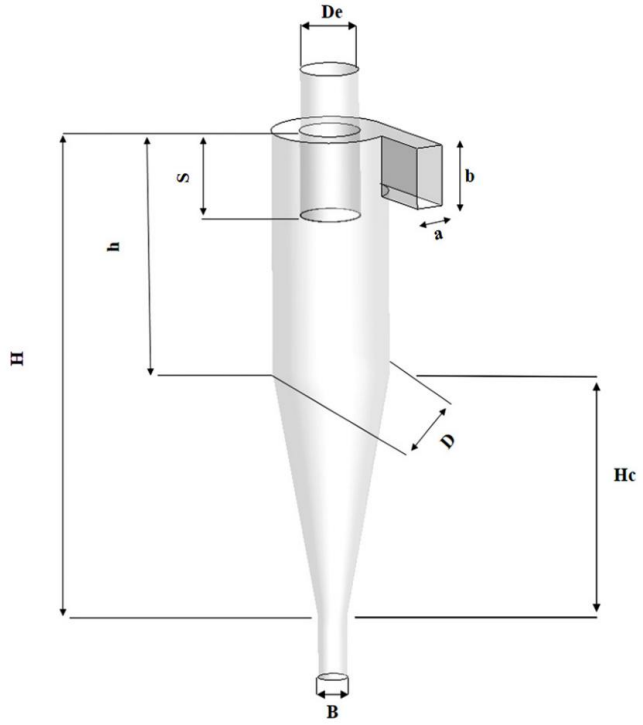
Nota: Obtenido de (Miller, 2017)

Variables geométricas y operativas.

Las dimensiones geométricas del separador ciclónico se caracterizan típicamente por una relación que incorpora el diámetro del cilindro, por ejemplo, xD, donde x es una constante. (C. Wang et al., 2023)

Figura 3

Parámetros geométricos de un separador ciclónico



Nota: Obtenido de (C. Wang et al., 2023)

Donde:

$\boldsymbol{a}$: Ancho de la sección transversal de la entrada.

$\boldsymbol{b}$: Altura de la sección transversal de la entrada.

$\boldsymbol{D_e}$: Diámetro del buscador de vórtice.

$\boldsymbol{D}$: Diámetro del cilindro.

$\boldsymbol{S}$: Profundidad del buscador de vórtice.

$\boldsymbol{H}$: Altura total.

$\boldsymbol{h}$: Altura del cilindro.

$\boldsymbol{H_c}$: Altura del cono.

$\boldsymbol{B}$**:** Diámetro de descarga.

A partir de sus parámetros geométricos podemos obtener relaciones que determinan la eficiencia del separador y la capacidad de flujo como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2

Resumen de los equipos de recolección de partículas

Parámetro	**Relación geométrica**	**Tipo de Separador ciclónico**		
		Alta eficiencia	Convencional	Alta Capacidad
Altura de la sección transversal de la entrada.	b/D	0.44–0.5	0.5	0.78–0.8
Ancho de la sección transversal de la entrada.	a/D	0.2–0.21	0.25	0.35–0.375
Diámetro del buscador de vórtice	D_e/D	0.4–0.5	0.5	0.75
Profundidad del buscador de vórtice	S/D	0.5	0.6–0.625	0.85–0.875
Altura del cilindro	h/D	1.4–1.5	1.75–2.0	1.5–1.7
Altura del cono	H_c/D	2.5	2.0	2.0–2.5
Diámetro de descarga	B/D	0.375–0.4	0.25–0.4	0.375–0.4

Nota: Modificado de (Miller, 2017)

Los parámetros operativos que influyen directamente en la eficiencia de separación y la ciada de presión son los siguientes:

Velocidad del flujo de entrada

El rendimiento del ciclón se caracteriza principalmente por la eficiencia de separación de partículas y la caída de presión entre la entrada y la salida, las cuales se ven severamente afectadas por la velocidad de entrada. (Wei et al., 2019)

Fassani & Goldstein, 2000 señala tras su estudio del efecto de la alta carga de sólidos de entrada sobre la caída de presión y la eficiencia de recolección de un separador ciclónico, encontró que una velocidad del flujo de entrada alta no garantiza un aumento de la eficiencia "En las condiciones de prueba, la eficiencia de recolección fue mayor para la velocidad de entrada de 18 m/s que para la de 27 m/s". Esto implica que existe un valor óptimo denominado V_{MEIV}, Velocidad de Entrada de Máxima Eficiencia.

(Yang et al., 2015) propone el siguiente modelo para obtener V_{MEIV} caracterizando la dinámica del flujo, propiedades del fluido, fenómenos de colisión y la geometría del ciclón:

$$V_{MEIV} = \frac{18\mu\,\beta}{d_{50}^2 \rho_p}\left(\sqrt{\mathrm{e\,f}^2\,(e+1) + \frac{(1-e)e^2\,R}{2.4\,K_a^{0.083}\,(1-dr)^{0.813}\,b}} - f(e+1)\right)\left(\frac{e^2}{2.4\,K_a^{0.083}\,(1-dr)^{0.813}\,b} - \frac{f^2(e+1)^2}{R}\right)^{-1}$$

Las variables pertenecientes al modelo se describen detalladamente en la Tabla 3 cuya importancia radica en que organiza cada símbolo con su significado físico y establece claramente sus unidades dimensionales:

Tabla 3

Variables del modelo para calcular la velocidad de entrada de máxima eficiencia

Categoría	Variable	Descripción	Unidades
Dinámica del flujo	β	Relación de la velocidad de entrada a la velocidad tangencial cerca de la pared	Adimensional
Propiedades del fluido	μ	Viscosidad del gas	Pa · s
	d_{50}	Tamaño o diámetro mediano de la partícula	m
	ρ_p	Densidad de las partículas	kg/m^3
Fenómeno de colisión	e	Coeficiente de restitución	Adimensional
	f	Coeficiente de fricción dinámica entre la partícula y la pared	Adimensional
Geometría del ciclón	K_a	Relación entre el área transversal del cilindro y el área de la entrada	Adimensional
	dr	Diámetro adimensional del buscador de vórtices D_e/D	Adimensional
	b	Ancho de la entrada del ciclón	m
	R	Radio del cuerpo del ciclón	m

Nota: Modificado de (Yang et al., 2015)

Si la velocidad supera la V_{MEIV}, la partícula rebota con tanta energía que entra en el vórtice ascendente y en consecuencia escapa por la parte superior afectando negativamente a la eficiencia.

Debido a que la viscosidad dinámica de los gases presenta una alta sensibilidad ante variaciones térmicas, se implementa la fórmula de Sutherland para modelar la dependencia con la temperatura de operación:

$$\mu(T) = \mu_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{T_0 + C}{T + C}$$

Donde:

- $\mu(T)$: Viscosidad dinámica del gas que se desea calcular en función de su temperatura de operación.
- μ_0: Viscosidad dinámica de referencia a una temperatura específica T_0.
- T: Temperatura de operación en la escala de Kelvin.
- T_0: Temperatura absoluta de referencia
- C: Constante de Sutherland

En la Tabla 4 se presenta los parámetros de Sutherland para diversos gases, específicamente la viscosidad dinámica de referencia, temperatura absoluta de referencia y constante de Sutherland.

Tabla 4

Parámetros de Sutherland para diversos gases

$\boldsymbol{Gas}$	$\boldsymbol{C\ (K)}$	$\boldsymbol{T_0(K)}$	$\boldsymbol{u_0(\mu Pa \cdot s)}$
Aire	120	291.15	18.27
H_2	72	293.85	8.76
N_2	111	300.55	17.81
O_2	127	292.25	20.18
CO_2	240	293.15	14.8

Nota: Modificado de González Santander Martínez & Castellano Estornell, 2000

Modelos de flujo multifásico gas–sólido

A fin de predecir los flujos multifásicos de gas y solido se han desarrollado varios modelos CDF, cada uno presenta sus ventajas y desventajas inherentes, por lo que un modelo es apropiado según factores como el sistema analizado, la precisión requerida y el costo computacional. El desarrollo de estos modelos se ha regido por dos enfoques fundamentales el enfoque Euler-Euler y el enfoque Euler-Lagrange. En este contexto, (Zhang et al., 2012) los establece de la siguiente manera:

- **Enfoque Euler-Euler:** El gas y las partículas son considerados como fases continuas que se interpenetran totalmente. Ambas fases se describen en términos de diferentes conjuntos de ecuaciones de conservación con términos de interacción que representan el acoplamiento de ambas fases.
- **Enfoque Euler-Lagrange:** Las partículas son tratadas individualmente y se calcula directamente el movimiento de cada partícula a través de las fuerzas que actúan sobre ella. Los modelos derivados de este enfoque se describen en la siguiente tabla:

Tabla 5

Descripción de los modelos de simulación bajo el enfoque Euler-Lagrange para flujos multifásicos gas-sólido.

Método	Descripción
Modelo de Fase Discreta (DPM)	Se utiliza para flujos con una fracción de volumen de sólidos inferior al 10%. El volumen ocupado por el sólido no es tomado en cuenta al ensamblar las ecuaciones de la fase continua, se desprecian la presión de las partículas y los esfuerzos viscosos debido a ellas.
Modelo de Fase Discreta Densa (DDPM-KTGF)	Es un modelo híbrido entre los enfoques Euler-Euler y Euler-Lagrange. El esfuerzo de los sólidos que actúan sobre partículas en consecuencia de las interacciones entre ellas se calcula a partir del tensor de esfuerzos proporcionado por la teoría cinética de flujo granular.
Método de Elementos Discretos (CFD-DEM)	Se usa para rastrear explícitamente los términos de interacción partícula-partícula y partícula-pared, este método se basa en el contacto

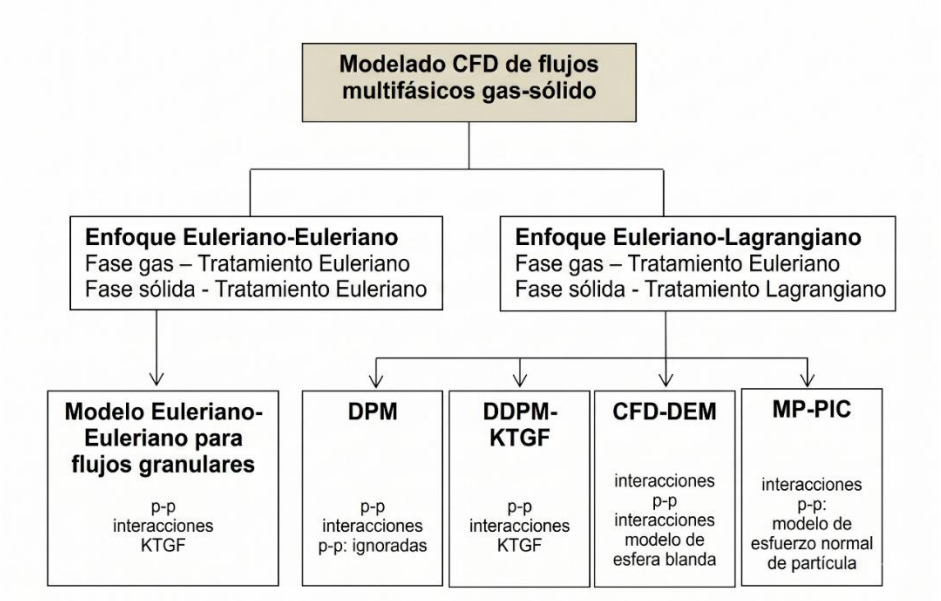
	directo y un modelo de resorte-amortiguador que calcula la fuerza de impacto entre partículas. El proceso de colisión o contacto resultante se resuelve mediante la integración numérica de las ecuaciones de movimiento.
Método de Partícula en Celda Multifásica (MP-PIC)	Este método modela la fuerza de colisión de las partículas en cada partícula como un gradiente espacial. En consecuencia, se desarrolla un modelo de esfuerzo normal de la partícula para describir colisiones entre partículas. Durante el proceso numérico, el gradiente de esfuerzo se calcula primero en la malla para posteriormente interpolar a partículas discretas.

Nota: Obtenido de (Ariyaratne et al., 2018)

Para resumir de forma visual cómo se dividen estos métodos de simulación y cómo manejan la relación entre el gas y el sólido, se presenta el siguiente esquema en la Figura 4:

Figura 4

Resumen de los enfoques de modelado para simulación de flujo multifásico gas-sólido



Nota: Modificado de (Ariyaratne et al., 2018)

Parámetros de desempeño

Eficiencia de separación

(Vermande Paganel et al., 2024) definió en el marco de la simulación de dinámica de fluidos computacional, la eficiencia en el modelo de partículas discretas (DPM) se realiza mediante la relación entre el número de partículas capturadas en la descarga y el total de partículas efectivamente rastreadas, restando de estas últimas aquellas que presentan trayectorias incompletas debido a su permanencia en regiones de recirculación. La expresión que define la eficiencia en un modelo DPM, es la siguiente:

$$\eta = \left(\frac{N_{trap}}{N_{track} - N_{inc}}\right) \times 100$$

cuyas variables son:

- η: Eficiencia de captura de partículas.
- $\mathrm{N_{trap}}$: Número de partículas atrapadas en la descarga.
- $\mathrm{N_{track}}$: Número total de partículas inyectadas inicialmente a través de la entrada del ciclón.
- $\mathrm{N_{inc}}$: Número de partículas incompletas que permanecen en regiones de recirculación.

Proporciones geométricas y su influencia

En el trabajo de Koçak (2026), se demostró un incremento en la eficiencia de recolección al reducir la proporción del diámetro del buscador de vórtice por debajo de 0.5. Específicamente, el estudio obtuvo el punto de máxima eficiencia operativa con una relación dimensional de 0.25. Dado que la adaptación de las proporciones recomendadas por Miller (2017) no consideran rangos tan bajos para esta relación dimensional, es probable que el separador a analizar haya sido diseñado bajo estos criterios clásicos de tal modo que presente un sobredimensionamiento en este parámetro. Por consiguiente, se plantea la hipótesis de que la eficiencia del separador actual puede optimizarse mediante la reducción del diámetro de dicho componente.

Otro parámetro relevante es la relación entre el espesor de pared del tubo buscador de vórtice y su diámetro. Masoud & Shahidzadeh (2011) demostraron que la eficiencia del separador aumenta a medida que disminuye esta proporción. En dicho estudio, el valor mínimo analizado para esta relación fue de 0.05. Por debajo de este límite, reducir aún más el espesor no produce mejoras en la eficiencia del sistema, una premisa que ha sido corroborada previamente en la literatura por el trabajo de Wang (2009).

Según (B. Wang, 2009), una longitud reducida o nula del tubo buscador de vórtice favorece la captura general de partículas. Por el contrario, un componente más largo incrementa la eficacia en la recolección de fracciones gruesas, pero penaliza significativamente la retención de material fino. El autor recomienda que este conducto no se extienda más allá de la transición entre el cuerpo cilíndrico y la sección cónica del separador, si el tubo llega justo hasta esa unión, la turbulencia propia de esa zona empieza a afectar la separación, y partículas gruesas que ya deberían haber quedado atrapadas pueden terminar escapando junto con el aire limpio en vez de caer hacia el cono.

Respecto a la longitud del cuerpo cilíndrico, (Shastri & Brar, 2020) determinaron que aumentarla reduce bastante la caída de presión del separador, aunque a costa de una disminución solo marginal en la eficiencia de recolección. Existe entonces una relación de compromiso entre ambos parámetros: como el presente estudio prioriza la eficiencia, esta dimensión se cataloga como una variable de prioridad secundaria.

La investigación de Odintsov et al. (2023) reporta que al extender la sección cónica se logra una reducción de la caída de presión en aproximadamente 130 Pa y un incremento de la eficiencia de recolección en un 4%. Sin embargo, esta forma de análisis con la metodología geométrica tiene una limitación importante, y es que los autores no mantuvieron constante al diámetro inferior del cono (D_p). Al variar la longitud del equipo cortándolo a diferentes alturas, también cambiaron el diámetro de salida, por lo que la supuesta mejora en el rendimiento aerodinámico no se puede atribuir únicamente a la extensión longitudinal del cono.

Oranje (2021), establece que el diámetro inferior de la sección cónica constituye un parámetro determinante como el conducto localizador de vórtice. El autor indica que el incremento de este diámetro mejora la eficiencia de recolección hasta alcanzar un límite máximo; específicamente, la mayor eficiencia se obtiene con una relación geométrica D_p/D_c de 0.6. Si el valor es menor a la consigna, el núcleo del vórtice choca con la pared del cono antes de llegar a la base del ciclón y arrastra de nuevo hacia el flujo las partículas ya depositadas en la capa límite, disminuyendo la eficiencia de separación. Si por el contrario se supera este valor óptimo, el vórtice se extiende más allá de la base cónica hacia el reservorio de recolección, facilitando así el reingreso de partículas ya capturadas. No obstante, advierte que al combinar esta proporción con una relación del buscador de vórtice (D_v/D_c) de 0.35, se produce un fenómeno de arrastre secundario de partículas con dimensiones superiores al diámetro de corte. Esto muestra que el diámetro óptimo del cono no se puede definir de forma aislada, sino junto con la relación del buscador de vórtice, criterio que se empleará posteriormente para evaluar la geometría del equipo instalado en INSELEC Cía. Ltda.

Capítulo III: Diagnóstico, diseño y optimización del separador ciclónico

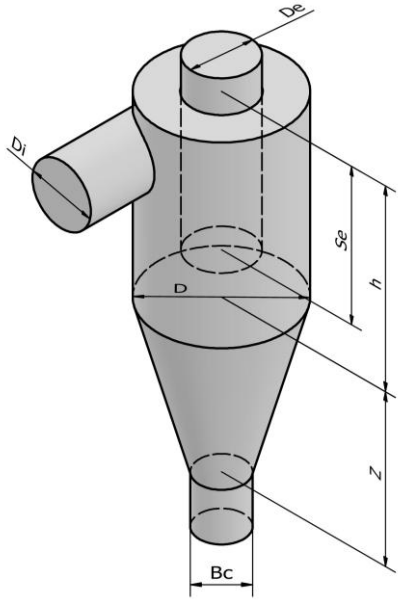
Revisión técnica y análisis del diseño existente

Levantamiento dimensional y reconstrucción del modelo CAD

La Figura 5 ilustra las variables adoptadas para los parámetros geométricos del separador ciclónico. Esta convención se aplicará a lo largo del presente documento con el objetivo de estandarizar la terminología y evitar las ambigüedades identificadas durante la revisión del estado del arte.

Figura 5

Representación gráfica de las variables usadas



Las dimensiones del separador ciclónico, registradas en la empresa INSELEC Cía. Ltda., se detallan en la Tabla 6. En esta se resume el valor numérico de cada magnitud junto con la definición paramétrica adoptada para el presente estudio.

Tabla 6

Nomenclatura y mediciones del separador ciclónico (INSELEC Cía. Ltda.)

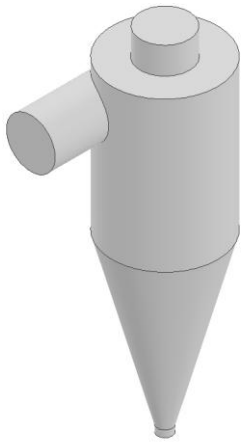
Descripción	Variable	Medida [cm]
Diámetro de entrada	D_i	37

Diámetro del buscador de vórtice	D_e	37
Longitud del buscador de vórtice	S_e	78
Diámetro del cuerpo	D	80
Longitud del cuerpo	h	104
Diámetro de salida del polvo	B_c	28
Longitud del cono	Z	96

Por otro lado, la reconstrucción tridimensional se llevó a cabo utilizando el software de diseño paramétrico Autodesk Inventor (versión 2026) en donde la Figura 6 se ilustra la reconstrucción computacional del separador. Es importante señalar que el modelado se enfocó en la extracción del volumen de control, es decir, el dominio fluido. Esta aproximación es necesaria para el posterior análisis numérico mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), permitiendo simular la interacción cinemática entre el flujo de aire y las partículas.

Figura 6

Modelo CAD, en base a las medidas del separador ciclónico en INSELEC Cía. Ltda.



Evaluación de las proporciones geométricas

La Tabla 7 presenta las relaciones dimensionales calculadas a partir de las medidas obtenidas del separador ciclónico en INSELEC Cía. Ltda. Asimismo, se indica la tipología del equipo contrastando estas proporciones con los criterios de diseño adaptados según lo descrito por Miller (2017).

Tabla 7

Relaciones geométricas del separador ciclónico analizado.

		Tipo de ciclón	
Variable	**Relaciones**	**Valores en INSELEC**	**Tipo de ciclón**
Diámetro de entrada	D_i/D	0.46	Alta Eficiencia
Diámetro del buscador de vórtice	D_v/D	0.46	Alta Eficiencia
Longitud del buscador de vórtice	S_e/D	0.975	Alto rendimiento
Longitud del cuerpo	h/D	1.3	+
Longitud del cono	Z/D	1.2	-
Diámetro de salida del polvo	B_c/D	0.35	Convencional

Nota. En la presente tabla, los parámetros que exceden los rangos empíricos establecidos por el autor se marcan con (+) y (-). El símbolo (+) representa una extrapolación donde se infiere un incremento en la eficiencia de recolección, basándose en la tendencia geométrica documentada. Por el contrario, el símbolo (-) sugiere que la cota actual penaliza la eficiencia del separador.

El primer parámetro para evaluar, y el de mayor relevancia, es el diámetro del tubo buscador de vórtice. El criterio establece que las relaciones dimensionales (D_v/D_c) inferiores a 0.5 maximizan la eficiencia operativa, ubicando el punto de máximo rendimiento cerca de una proporción de 0.25. Dado que la geometría actual del separador en INSELEC Cía. Ltda. se basa en proporciones empíricas clásicas que no contemplan rangos tan bajos, la reducción de este diámetro constituye una de las hipótesis con mayor relevancia y una de las variables críticas a iterar durante las simulaciones computacionales.

Un parámetro secundario evaluado es la relación entre el espesor de pared del tubo localizador y su diámetro. El equipo instalado cuenta con un tubo de 2 mm de espesor, lo que resulta en una proporción geométrica de 0.005. Al tratarse de un valor de magnitud considerablemente baja respecto a los límites aerodinámicos críticos documentados para este componente, se determina que el espesor de pared tiene un impacto en la eficiencia y la caída

de presión despreciable. Por tanto, al efectuar la optimización, se dejará de lado esta variable, manteniéndola constante.

Los criterios de diseño requieren que la longitud del tubo localizador de vórtice se sitúe entre la sección de entrada y la transición cilindro-cónica. El respeto de esta restricción garantiza que se pueda recoger el material sin alterar el equilibrio de retención entre el polvo fino y el grueso. No se puede justificar técnicamente la alteración de su diseño, ya que el separador instalado cumple estrictamente con esta cota geométrica. Por otro lado, la longitud del cuerpo cilíndrico influye menos en el comportamiento aerodinámico global que otras dimensiones del equipo.

Descartando estas dos cotas longitudinales como foco de la repotenciación, el análisis se concentra en la configuración del cono inferior, cuya geometría sí presenta una alta sensibilidad operativa sobre la eficiencia de separación. El criterio de optimización establece que el incremento del diámetro de descarga (B_C) mejora sustancialmente la eficiencia de recolección, proyectando un límite máximo de rendimiento para una relación geométrica B_C/D cercana a 0.6. Sin embargo, la modificación de esta variable se debe analizar con sumo cuidado y evaluar su interacción con el tubo localizador para evitar el fenómeno de reingreso de partículas (por arrastre) superiores al tamaño de crítico. Al contrastar estas directrices teóricas con las mediciones físicas, se evidencia que la relación de descarga del ciclón actual $(B_C/D = 0.35)$ se encuentra considerablemente por debajo del valor óptimo. Esto justifica un análisis para modificar el diámetro inferior del cono como la segunda variable prioritaria para maximizar la recuperación de la pintura.

Criterios de evaluación para optimización del separador ciclónico

La validación del rediseño, alineada a los requerimientos industriales de INSELEC Cía. Ltda., establece como métrica principal de desempeño el análisis de la pintura en polvo emitido por el conducto localizador de vórtice. El criterio de aceptación sugiere que la totalidad de estas partículas fugitivas posean un diámetro menor a 20 μm. Para garantizar la viabilidad del

proceso, se ha definido una restricción operativa concurrente: se tolerará una fracción controlada de polvo fino en la descarga inferior (material recuperado). Esta proporción no deberá superar la concentración de polvo fino presente en la distribución granulométrica de la pintura virgen, con el fin de preservar las propiedades de aplicación del producto. A partir de las mediciones provistas por la planta, se instaura un umbral máximo de diseño del 10% para esta retención de finos, adoptando el 15% documentado en mediciones históricas como límite operativo absoluto. Debido a restricciones físicas en la configuración del equipo en donde la descarga del separador ciclónico está acoplada directamente al tanque de depósito, impidiendo la extracción de muestras de pintura recuperada, el control metrológico se ejecutará en el depósito de desecho. En este punto de rechazo se evaluará comparativamente el incremento en la concentración de partículas finas extraídas del sistema.

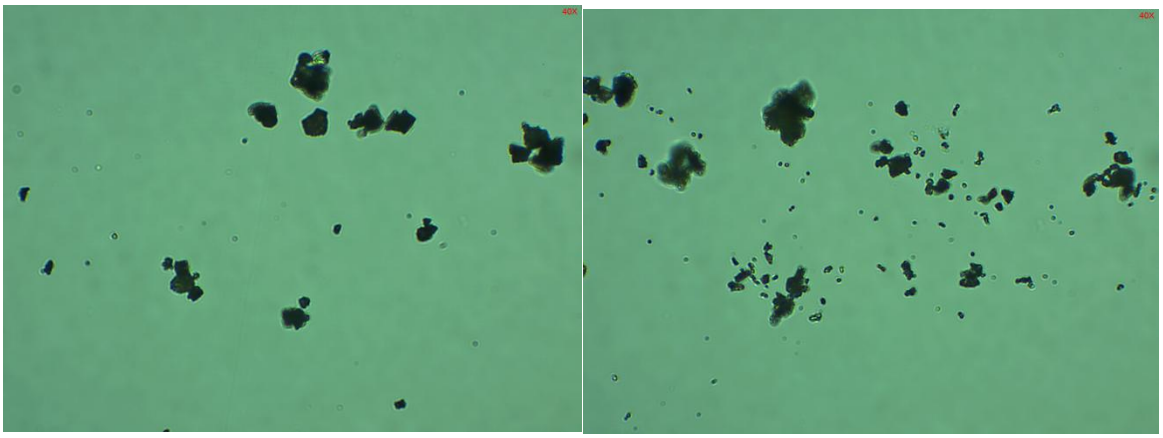
Con el propósito de diagnosticar el desempeño de la configuración original, se llevaron a cabo ensayos de caracterización en el Laboratorio de Reología de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. El análisis de las muestras evidenció el arrastre de pintura en polvo útil a través del conducto localizador de vórtice. Esta emisión directa hacia el flujo de desecho representa una pérdida sustancial de material que se podrá reusar, confirmando la ineficiencia del diseño actual y validando la pertinencia técnica y económica de su repotenciación.

En el análisis dimensional del material se presenta en la Figura 7 mediante micrografías obtenidas en el laboratorio. La imagen de la izquierda (a) corresponde a una muestra de pintura en polvo virgen, analizada para establecer su estructura y granulometría de referencia para el proceso de simulación. La imagen de la derecha (b) exhibe el material particulado recolectado tras el proceso de separación original, es decir, el flujo de desecho que escapa a través del tubo buscador de vórtice. En ambas capturas se evidencia una mezcla heterogénea de fracciones finas y gruesas, lo que confirma el arrastre indeseado de material útil. Las partículas registradas presentan un diámetro máximo de 80 μm y un mínimo de 3 μm. Cabe señalar que,

debido al medio de suspensión utilizado para la observación, existen burbujas en el fluido que no deben confundirse con material particulado.

Figura 7

Caracterización microscópica: a) polvo de pintura virgen de referencia; b) material particulado de desecho emitido por el conducto localizador de vórtice.



A partir de estos hallazgos, se estructuró el protocolo metrológico para evaluar la eficiencia del separador. En el reservorio de desechos, situado aguas abajo del ventilador, se llevó a cabo la recolección del material de rechazo. Con el fin de dar representatividad estadística a los datos y evitar la contaminación cruzada con el polvo acumulado con anterioridad a la optimización, se propuso tomar muestras de control directamente de las paredes del conducto. Por otro lado, sacar muestras del material recuperado se nos convirtió en un verdadero reto operativo. Necesitábamos medir esa fracción de polvo fino retenido para comprobar si nuestros criterios de diseño funcionaban, pero la configuración de la máquina nos complicó la tarea.

Al principio, pensamos en extraer el polvo que se quedaba adherido a las paredes de la tolva inferior. Tuvimos que idear esta alternativa porque el sistema de la fábrica cuenta con una bomba de transferencia continua. En la práctica, esta bomba absorbe el polvo reciclado y lo impulsa de inmediato hacia el tanque de suministro, lo que nos hacía físicamente imposible abrir el conducto para tomar una muestra de volumen convencional sin detener el proceso. Sin

embargo, al estudiar el comportamiento transitorio del ciclón en la fase inicial del proceso de pintado, se descartó el muestreo en esta sección, ya que la inestabilidad aerodinámica inicial y los depósitos acumulados residuales alteran la homogeneidad de la muestra, restando representatividad estadística al análisis granulométrico.

Simulación computacional CFD

El modelado numérico se llevó a cabo utilizando el entorno de simulación Ansys Fluent (versión 2019 R2). La elección de esta herramienta se fundamenta en su alta capacidad para la resolución computacional de flujos multifásicos, condición inherente al transporte de material particulado suspendido en el fluido. Debido a las dimensiones físicas del separador ciclónico a escala real, la discretización espacial del dominio fluido exigió un número de elementos que supera los límites de procesamiento de las licencias de software estudiantiles. Para superar esta restricción, la simulación numérica se ejecutó utilizando la licencia académica provista por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. El acceso a esta versión eliminó las limitantes en la densidad del mallado, permitiendo configurar una resolución espacial lo suficientemente fina como para capturar con precisión los gradientes aerodinámicos y predecir el comportamiento físico del flujo.

Definición de condiciones de frontera

El objetivo principal de esta parametrización es reproducir, con la mayor fidelidad posible, las condiciones operativas reales del separador ciclónico instalado en INSELEC Cía. Ltda. Se implementó el modelo de turbulencia $k-\omega$ SST, seleccionado por su capacidad para resolver los intensos gradientes de presión y la curvatura de las líneas de corriente típicas de un flujo turbulento rotacional.

Respecto al Modelo de Fase Discreta (DPM), el seguimiento de las partículas se realizará mediante el método de *parcels* (agrupaciones de partículas) para optimizar el rendimiento computacional. La inyección de la fase discreta se configuró en el plano transversal del ducto de admisión (37 cm de diámetro), aplicando una distribución granulométrica de Rosin-

Rammler. Para asegurar la correcta integración numérica de las trayectorias y rastrear el destino final del material sin truncamientos computacionales, el modelo se parametrizó con un límite de 80 000 pasos y un factor de longitud de 5.

Complementariamente, se activó la fuerza de sustentación de Saffman (Saffman Lift Force). Esta configuración es fundamental para calcular el efecto que ejercen los intensos gradientes de velocidad sobre las partículas, un fenómeno aerodinámico crítico en la capa límite adyacente a las paredes del equipo. Para el cálculo del arrastre, se aplicó una ley de arrastre no esférica (*non-spherical drag law*) con un factor de forma de 0.8 y se consideró la rugosidad superficial del material, en concordancia con las irregularidades morfológicas observadas en las micrografías. La configuración granulométrica se discretizó en cuatro rangos representativos basados en la caracterización de la pintura virgen:

- Primer grupo de 0-20 μm con una fracción másica del 11%
- Segundo grupo de 20-45 μm con una fracción másica del 42%
- Tercer grupo de 45-75 μm con una fracción másica del 34%
- Cuarto grupo de 75-100 μm con una fracción másica del 8%

Cabe resaltar que el porcentaje masico de cada inyección corresponde a un promedio de la caracterización granulométrica dada. La fracción másica de cada rango se regulará numéricamente mediante el ajuste del número de partículas que se inyectaran en cada grupo.

Esta segmentación en grupos discretos tiene como propósito determinar con precisión el destino físico de las partículas según su tamaño, evacuación por el escape superior hacia el contenedor de desperdicio o precipitación hacia la descarga inferior para la recirculación de la pintura. Esta metodología es indispensable debido a que el reporte estándar del Modelo de Fase Discreta (DPM) en Ansys Fluent cuantifica el número neto de partículas atrapadas o escapadas, pero no discrimina directamente los diámetros individuales en los reportes de flujo de las salidas.

En cuanto a los materiales, se definió el aire como la fase continua. Su densidad se estableció en 0.86 kg/m³, valor ajustado a la altitud geográfica de las instalaciones de INSELEC Cía. Ltda. (2660 m s. n. m.). Para la viscosidad dinámica, se asumió una temperatura operativa promedio de 20 °C (293.15 K), calculando su valor mediante la aproximación de Sutherland:

$$\mu = 1.458 \times 10^{-6} \mathrm{T}^{1.5} \left(\frac{1}{\mathrm{T} + 110.4}\right) \left[\frac{\mathrm{N} \cdot \mathrm{s}}{\mathrm{m}^2}\right]$$

Al sustituir la temperatura absoluta, se obtiene la viscosidad de operación:

$$\mu = 1.458 \times 10^{-6} (293.15)^{1.5} \left(\frac{1}{(293.15) + 110.4}\right) \left[\frac{\mathrm{N} \cdot \mathrm{s}}{\mathrm{m}^2}\right]$$

$$\mu = 1.813 \times 10^{-5} \left[\frac{\mathrm{N} \cdot \mathrm{s}}{\mathrm{m}^2}\right]$$

Evaluando el modelo térmico, se estableció una viscosidad operativa de 1.813-05 kg/(m·s). La fase discreta, correspondiente al material particulado, se modeló las partículas de pintura de polvo con una densidad constante de 1810 kg/m³.

Respecto a las condiciones de frontera, la sección de ingreso (*Inlet*) se configuró con una velocidad normal de 16.8 m/s (valor obtenido de otros fabricantes debido a que no se dispone de dicho dato) y un diámetro hidráulico de 0.37 m, asignando una condición de reflexión (*Reflect*) para el Modelo de Fase Discreta (DPM). En la descarga superior del tubo buscador de vórtice (*Outlet Up*), por donde escapa la pintura de desecho, se implementó una salida con presión manométrica nula (0 Pa), un diámetro hidráulico equivalente y una condición DPM de escape (*Escape*). A las paredes de confinamiento del dominio (Wall_fluid) se les asignó la condición cinemática de reflexión (Reflect). Para poder simular matemáticamente la recolección física del material, se parametrizó la frontera correspondiente a la tolva inferior (Outlet Down) con la condición de atrapamiento (Trap).

El arranque del cálculo iterativo se ejecutó con una inicialización estándar referenciada a la sección de admisión (*Compute from: Inlet*), fijando la magnitud inicial del campo de flujo en el eje X en −16.8 m/s. La elección de este método tuvo como propósito optimizar el tiempo

computacional de arranque de la simulación. El cálculo se programó para un total de 600 iteraciones, asegurando así el desarrollo convergente del campo de flujo. El resumen de estas configuraciones se detalla en la Tabla 8.

Tabla 8

Resumen de las condiciones de frontera y parámetros de simulación implementados en Ansys Fluent.

	Parámetro de Ansys Fluent	**Valor**	
Modelos	Viscoso	K Omega SST	
	Fase Discreta	Tipo de inyección	Group
		Lugar de inyección	Coordenadas del centro Inlet
		Distribución de diámetros	Rosin-Rammler
		Máx. Número de pasos	80000
		Factor de longitud de paso	5
		Saffman Lift Force	Si
		Point Properties Velocidad: 8 m/s Parámetro de Propagación: 3.5 Número de diámetros: 20	**Rechazo** Diámetro mín.: 1e-06 m Diámetro máx.: 1.5e-05 m Diámetro Prom.: 1e-05 m Total Flow Rate: 1.1e-4
			Aceptación 20-45 Diámetro mín.: 20e-06 m Diámetro máx.: 45e-06 m Diámetro Prom.: 30e-06 m Total Flow Rate: 4.2e-4
			Aceptación 45-75 Diámetro mín.: 45e-06 m Diámetro máx.: 75e-06 m Diámetro Prom.: 60e-06 m Total Flow Rate: 3.4e-4
			Aceptación 75-100 Diámetro mín.: 75e-06 m Diámetro máx.: 100e-06 m Diámetro Prom.: 87e-06 m Total Flow Rate: 0.8e-4
		Turbulent Dispersion	Modelo de Dispersión: Discrete-random-walk
			Número de intentos: 10
			Constante de escala de tiempo: 0.15

		Phisical Models	Drag Law : esférica con la activación del Rough wall model
Materiales	Fluido - Aire	Densidad	0.86 kg/m3
		Viscosidad	1.813e-05 kg/(m*s)
	Partículas	Densidad constante	1810 kg/m3
Condiciones de borde	Inlet	Velocidad	16.8 m/s
		Diámetro hidráulico	0.37 m
		DPM	Reflect
	Outlet up	Diámetro hidráulico	0.37 m
		DPM	Escape
		Presure	0 Pa
	Outlet down	DPM	Trap
	Wall_fluid	DPM	Reflect
Inicialización	Método de inicialización	Inicialización Estándar	
	Compute from	Inlet	
	X Velocity	−16.8 m/s	
Cálculo de Ejecución	Número de iteraciones	600	

Nota. Durante el desarrollo de las simulaciones, la única condición operativa modificada fue la velocidad de ingreso de las partículas. Los demás parámetros físicos, condiciones de frontera y configuraciones del *Setup* se mantuvieron estrictamente constantes a lo largo de todo el estudio.

Estudio de independencia de malla

Para el estudio de independencia de malla, se mantuvieron constantes las condiciones de frontera y modelos físicos previamente establecidos. Se escogió como parámetro de control para evaluar la estabilidad numérica la caída de presión (ΔP) a través del equipo. Este análisis permite garantizar la convergencia espacial de la solución y asegurar la correcta resolución aerodinámica del vórtice, ya que una discretización espacial excesivamente gruesa tiende a subestimar la pérdida de carga del sistema.

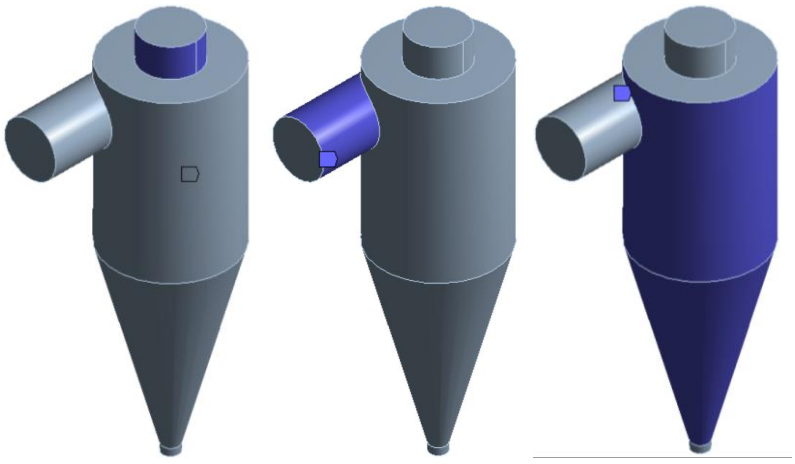
Para el mallado se utilizó un elemento de tipo tetraédrico para la generación de la discretización inicial, la cual luego sería convertida a celdas poliédricas dentro del *Setup*. Esta decisión metodológica se sustenta en el comportamiento de la versión de Ansys empleada. Al

utilizar elementos tetraédricos, las métricas en el módulo de mallado eran óptimas. No obstante, al importar la malla al entorno de configuración (*Setup*), la calidad descendía por debajo del mínimo recomendado. Por el contrario, el flujo de trabajo para convertir tetraedros a poliedros preserva la integridad de las métricas de calidad de la malla, justificando así el paso adicional de transformación topológica.

Con el fin de obtener una precisión computacional y datos representativos de la operación física, se realizó un refinamiento de malla en las zonas susceptibles a fuertes caídas de velocidad y colisiones con el material particulado. En particular, se aumentó la densidad de malla en las paredes del cuerpo cilíndrico, la sección cónica, el tubo buscador de vórtice y la tubería de admisión. En esta última, el refinamiento es necesario debido a que las partículas se inyectan en trayectorias muy próximas a las paredes internas. Las superficies sometidas a este tratamiento de refinamiento, fundamentales para la correcta resolución del modelo, se ilustran en la Figura 8.

Figura 8

Zonas de refinamiento de malla en la geometría del separador ciclónico



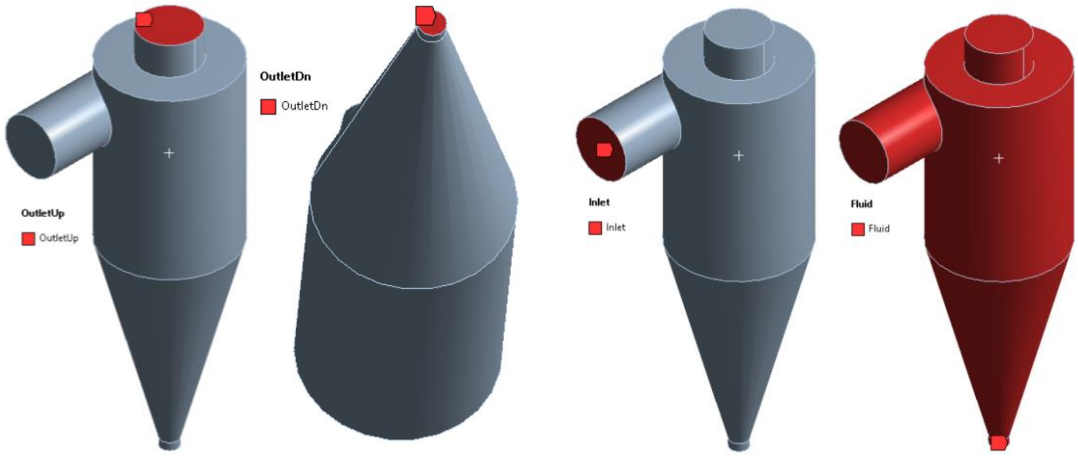
Nota. Las superficies destacadas corresponden a: a) cilindro y cono, b) tubo buscador de vórtice, y c) tubo de entrada.

Un aspecto complementario para considerar es la asignación de las superficies o secciones en donde se aplicaron las configuraciones anteriores (*reflect*, *escape* y *trap*). La

Figura 9 ilustra de manera esquemática las zonas físicas del dominio computacional donde se aplicaron dichos parámetros operativos y cinemáticos.

Figura 9

Identificación de las superficies usadas en la simulación



Nota. Las superficies operativas se indican en color rojo junto con su respectiva designación, utilizada para la asignación de parámetros.

Con el objetivo de optimizar los recursos computacionales y sistematizar la recolección de resultados, se procedió a parametrizar las variables. Como parámetros de entrada se definieron el tamaño mínimo y máximo de los elementos, los cuales gobernarán el nivel de refinamiento en las superficies críticas del modelo. Por otro lado, como parámetros de salida se establecieron: las métricas de calidad de la malla (para asegurar que la variación de tamaño no degrade las celdas), la presión en la sección de admisión (*Inlet*) y la presión en el conducto de descarga superior (*Outlet Up*). El monitoreo de estas presiones permite evaluar la caída de presión del vórtice. La matriz de los parámetros configurados y monitorizados se expone en la Tabla 9.

Tabla 9

Variables paramétricas de diseño y evaluación para la discretización del dominio computacional

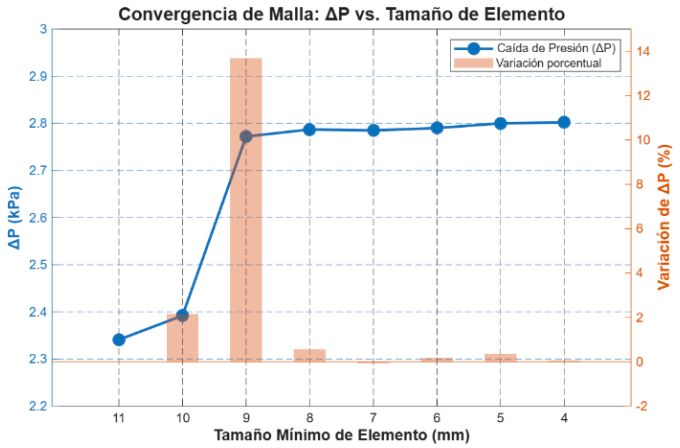
Tamaño Min [mm]	Tamaño Max [mm]	Quallity Mesh	Mesh Elements	Inlet [kPa]	Oulet Up [kPa]	ΔP [MPa]	Variación de ΔP
11	66	0,1485	1692569	2.8524	0.512	2.341	-

10	60	0,1778	2082400	2.9152	0.523	2.392	2.15%
9	54	0,1901	2616824	3.2926	0.521	2.772	13.69%
8	48	0,1863	3319304	3.3027	0.515	2.787	0.56%
7	42	0,1776	4393912	3.2987	0.513	2.785	-0.07%
6	36	0,1786	6080748	3.3062	0.516	2.790	0.18%
5	30	0,1802	8957994	3.3168	0.516	2.800	0.36%
4	24	0,1842	14484895	3.3210	0.519	2.802	0.06%

A partir de los datos obtenidos, se calculó la variación porcentual de la caída de presión global ($\Delta P = P_{inlet} - P_{outlet_up}$). Como se observa en la Figura 10, para tamaños de elemento inferiores a 8 mm, las fluctuaciones se estabilizan por debajo del 1%, alcanzando una discrepancia mínima del 0.6% a los 4 mm. Por otro lado, al analizar las magnitudes absolutas de forma individual, se evidencia que la presión dinámica en la salida superior (*Outlet Up*) reduce significativamente su variabilidad a partir de un tamaño de malla de 6 mm. Además, se verifica que la calidad de la malla se mantiene dentro de los rangos óptimos, mientras que el número de elementos experimenta un crecimiento exponencial, factor limitante para la viabilidad del estudio y el coste computacional.

Figura 10

Representación gráfica de los parámetros de entrada y salida para el estudio de independencia de malla



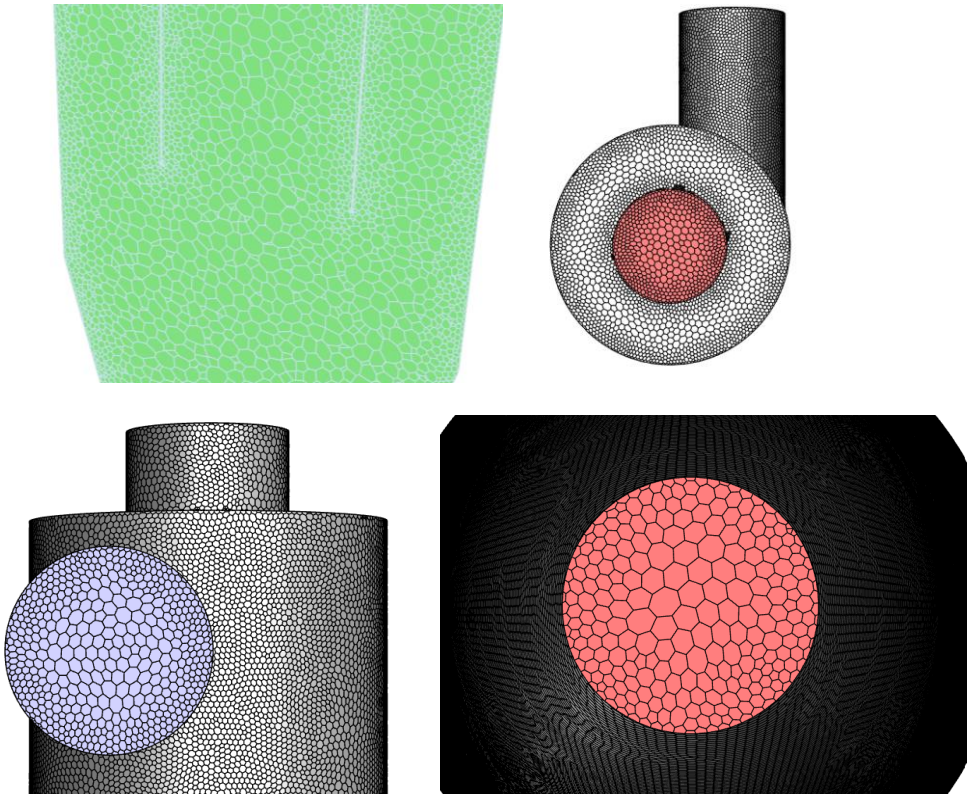
Nota. Se expone la estabilización numérica de la caída de presión

Con base en estos resultados, se seleccionó como dimensión óptima un tamaño de elemento de 6 mm. Esta configuración representa el equilibrio idóneo entre la estabilidad numérica aerodinámica y el volumen total de celdas generadas, optimizando la resolución de los vórtices internos mediante un uso eficiente del recurso computacional.

La Figura 11 muestra cómo quedó configurada la malla definitiva que utilizamos para las simulaciones. Esta vista corresponde al dominio ya cargado en *Ansys Fluent*, justo después de que ejecutamos la conversión a celdas poliédricas (*polyhedra*). Al revisar visualmente la estructura en el programa, comprobamos que el mallado se construyó de manera correcta. Pudimos notar que los cambios de tamaño entre los elementos son bastante suaves y, lo más crítico para que el cálculo no arroje errores, nos aseguramos de que no existieran aglomeraciones extrañas ni celdas deformadas.

Figura 11

Visualización del mallado poliédrico final de 6 mm en las distintas secciones del separador



Nota. Las fronteras operativas conservan la codificación de colores identificada previamente. La región resaltada en verde representa un plano de corte transversal, aplicado con el fin de observar la distribución espacial de los elementos poliédricos en el volumen interno del separador ciclónico.

Velocidad de las partículas de entrada

No disponiendo de datos de la velocidad aerodinámica real con que opera el separador ciclónico, el primer paso metodológico será el cálculo de la velocidad de entrada óptima requerida para asegurar un diámetro crítico de 20 μm. Esta estimación analítica preliminar es crucial, ya que el equipo está en marcha en la línea de producción y se debe minimizar el tiempo de inactividad que tendrá durante la futura intervención física. También se harán simulaciones con velocidades de entrada mayores y menores al valor teórico calculado. Este barrido numérico servirá para diagnosticar el comportamiento del flujo bajo las condiciones deficientes actuales, y para entender de donde proviene el arrastre excesivo de materia prima.

Cálculo de la velocidad óptima

Para el cálculo analítico de la velocidad óptima de inyección, se empleó un modelo matemático empírico documentado en la literatura, el cual relaciona el diámetro geométrico del ciclón con el tamaño de las partículas. La expresión que rige este comportamiento es la siguiente:

$$V_{MEIV} = \frac{18\mu\,\beta}{d_{50}^2 \rho_p}\left(\sqrt{\mathrm{e}\,\mathrm{f}^2\,(e+1) + \frac{(1-e)e^2\,R}{2.4\,K_a^{0.083}\,(1-dr)^{0.813}\,b}} - f(e+1)\right)\left(\frac{e^2}{2.4\,K_a^{0.083}\,(1-dr)^{0.813}\,b} - \frac{f^2(e+1)^2}{R}\right)^{-1}$$

Para establecer la temperatura operativa del fluido (T), se promediaron los registros históricos de la estación meteorológica "La Tola", ubicada a 5.98 km de las instalaciones de la planta. De esta fuente se obtuvo una temperatura media de 22.9 °C, equivalente a 296.05 K.

Con base en esta temperatura, la viscosidad dinámica del aire se determinó analíticamente mediante la correlación térmica de Sutherland:

$$\mu(T) = \mu_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{T_0 + C}{T + C}$$

Los coeficientes de ajuste para el modelo del aire se listan en la Tabla 4, adoptando una constante de Sutherland de C = 120 K, una temperatura base de T_0= 291.15 K y una viscosidad de referencia μ_0 = 18.27 $\mu Pa\ s$. Al evaluar la función para el estado termodinámico de la planta, la expresión se reduce a:

$$\mu(296.05) = 18.27 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{296.05}{291.15}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{291.15 + 120}{296.05 + 120}$$

$$\mu(296.05) = 1.851 \cdot 10^{-5}\ Pa \cdot s$$

En cuanto a las propiedades de interacción cinemática en el modelo, Respecto al coeficiente de restitución normal (e), Marinack et al. (2013) realizaron ensayos de caída libre con esferas de distintos materiales impactando placas delgadas, obteniendo un valor de e ≈ 0.71 para impactos metálicos específicamente esferas de acero bajo en carbono sobre placas de acero para herramientas, con una relación geométrica d/t = 0.75, y mostrando además que e depende de la velocidad de impacto, las propiedades del material y esta relación diámetro-espesor.

En cuanto al coeficiente de fricción dinámica pared-partícula (f), se tomó como referencia el trabajo de (Eliezer et al., 1978), quienes mediante ensayos pin-disco entre resina epóxica y acero determinaron un valor de f ≈ 0.8 en estado estacionario, muy por encima del valor de contacto inicial de 0.3. Los autores atribuyen esta diferencia a que la fricción medida corresponde a capas de óxido de hierro transferidas por adhesión, más que al contacto directo entre los materiales, y que se mantiene estable ante cambios de temperatura y carga. Con base en esto, el coeficiente de restitución normal (e) se fijó en 0.71, mientras que el coeficiente de fricción dinámica pared-partícula (f), se parametrizó con un valor escalar de 0.8.

En cuanto a la fase sólida, la densidad másica (ρ_p) mantendrá el valor especificado en la configuración de la simulación, estableciéndose en 1810 kg/m^3. Los parámetros geométricos

restantes conservan las magnitudes previamente definidas para el equipo físico: un diámetro principal del ciclón (D) de 0.80 m, un diámetro de admisión (D_i) de 0.37 m, y una relación adimensional para el tubo buscador de vórtice (dr) de 0.46. Finalmente, la relación de área de entrada (K_a) asume un valor de 4.67, determinado a partir de la relación de las secciones transversales circulares $\left(\frac{D}{D_i}\right)^2$.

La Tabla 10 presenta el resumen de los valores introducidos en la ecuación estableciendo como restricción principal el diámetro crítico de separación estipulado (20 μm)

Tabla 10

Valores de entrada para el modelo de la velocidad óptima de máxima eficiencia

Categoría	Variable	Valor	Unidades
Dinámica del flujo	β	1	Adimensional
Propiedades del fluido	μ	1.851×10^{-5}	Pa · s
	d_{50}	20×10^{-6}	m
	ρ_p	1810	kg/m^3
Fenómeno de colisión	e	0.71	Adimensional
	f	0.8	Adimensional
Geometría del ciclón	K_a	4.67	Adimensional
	dr	0.46	Adimensional
	b	0.37	m
	R	0.4	m

De este modo, la velocidad cinemática óptima requerida para el sistema se define como:

$$V_{MEIV} = 20.84\ m/s$$

Por tanto, este valor representa la velocidad aerodinámica teórica que deberá alcanzarse y validarse mediante medición física en la tubería de entrada del separador ciclónico. En caso de que el diagnóstico inicial demuestre que el equipo ya opera bajo este

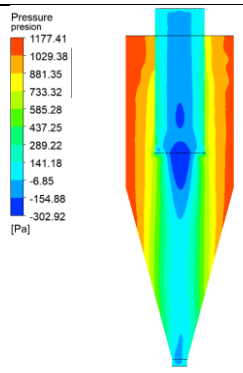
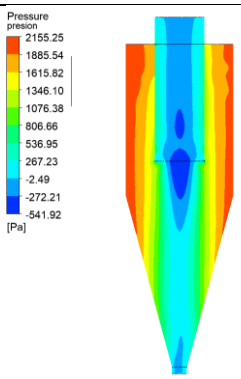
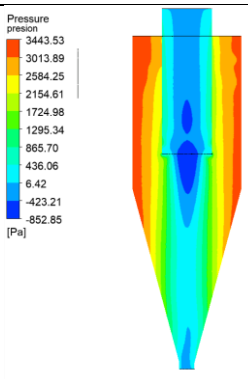
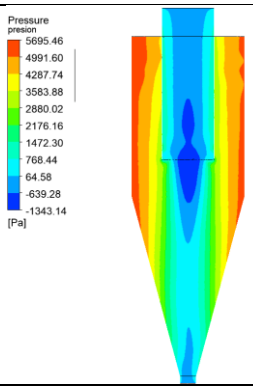
régimen cinemático, se descartará la intervención sobre esta variable, dado que constituye el punto de operación óptimo para garantizar la eficiencia de separación requerida.

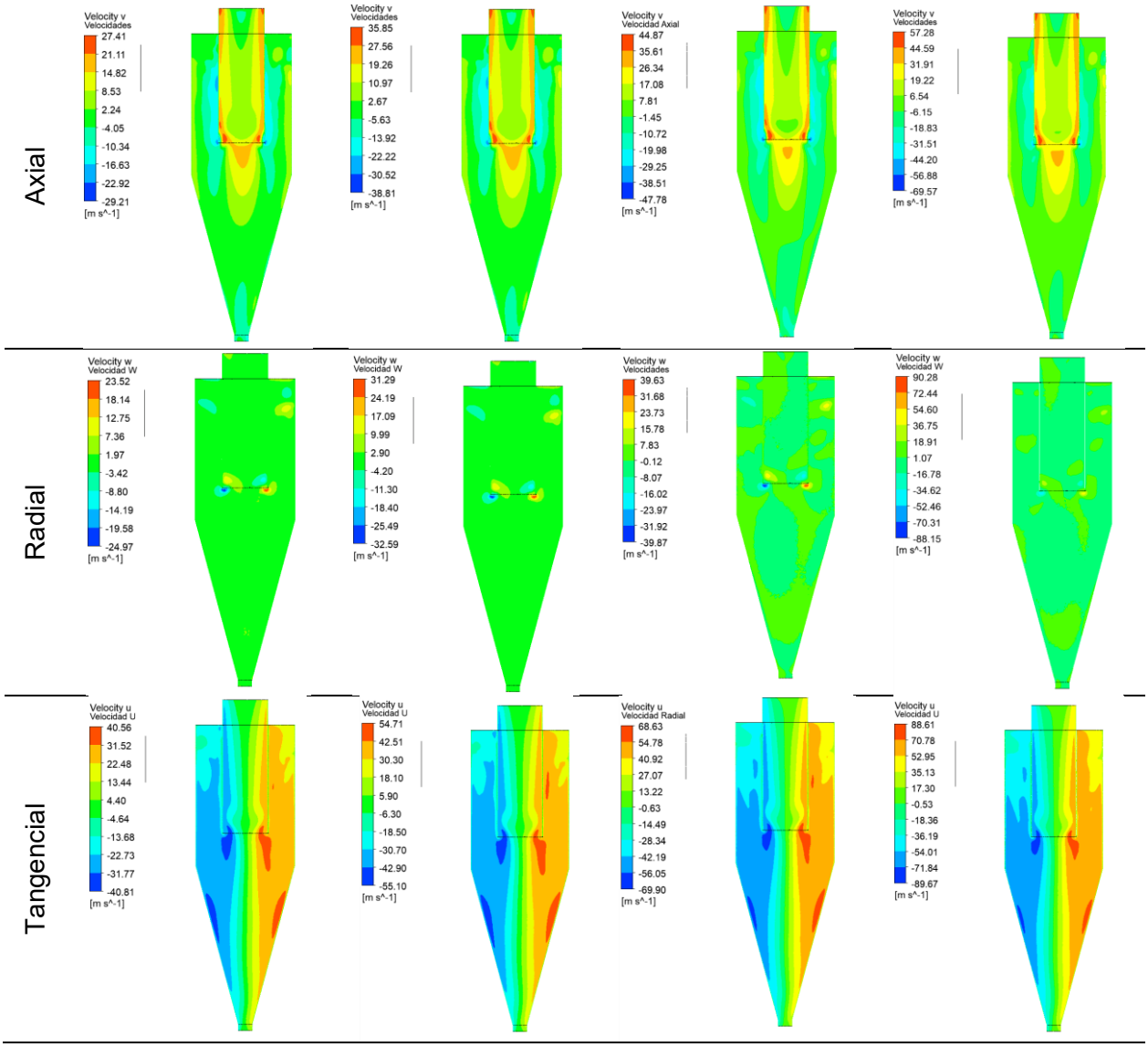
Análisis de sensibilidad frente a variaciones de velocidad

Con el objetivo de evaluar la sensibilidad del modelo numérico ante fluctuaciones cinemáticas, se ejecutó un barrido paramétrico considerando las siguientes cuatro velocidades de inyección: 12 m/s, 16 m/s, 20 m/s y 25 m/s. El análisis de estos escenarios iterativos permitió cuantificar el impacto directo de la velocidad de admisión sobre el rendimiento del sistema, estableciendo una base comparativa respecto a la configuración deficiente original del equipo. Los perfiles aerodinámicos resultantes se sintetizan en la Tabla 11, la cual contrasta el comportamiento de la caída de presión del sistema y la distribución espacial de los componentes vectoriales del flujo (axial, radial y tangencial).

Tabla 11

Variación de los contornos de presión y velocidad direccional en función de la velocidad de entrada.

	12 m/s	16 m/s	20 m/s	25 m/s
Presión				



Los contornos de presión estática revelan la estructura clásica de un flujo ciclónico: un núcleo de baja presión (asociado al *vortex finder*) y zonas de alta presión adyacentes a las paredes cilíndricas. El análisis comparativo demuestra que la presión máxima experimenta un incremento drástico al aumentar la velocidad. Al revisar los resultados de la simulación a 12 m/s, notamos que la presión máxima contra la pared del ciclón rondaba los 1177 Pa. Sin embargo, al empujar el flujo hasta el límite de 25 m/s, el esfuerzo estructural se disparó hasta alcanzar los 5744 Pa. Estos números nos comprueban en la práctica una regla fundamental del sistema, la caída de presión (ΔP) interna crece de forma proporcional al cuadrado de la

velocidad de entrada. A la hora de tomar decisiones de diseño, esto nos marca un límite claro. Aunque inyectar aire a 25 m/s nos ayude a separar un poco mejor la pintura, obligaría al extractor a consumir una cantidad inaceptable de energía eléctrica solo para lograr vencer toda esa resistencia aerodinámica.

Con respecto al perfil de velocidad axial, se observa que la mayor cantidad de movimiento se concentra en las cercanías de las paredes del tubo buscador de vórtice y en la periferia del separador ciclónico. Además, se evidencia que la condición operativa de 20 m/s es la única que logra establecer un flujo de descenso adecuado para el transporte de las partículas. A velocidades inferiores, existe una zona más amplia y alargada de velocidad positiva (flujo ascendente hacia la descarga), la cual se reduce a medida que se incrementa la velocidad de entrada. Por otro lado, al someter el sistema a 25 m/s, la velocidad descendente es prácticamente inexistente, predominando una velocidad mínima ascendente en la mayor parte del cono (al igual que a velocidades menores de 20m/s).

Un aspecto adicional para destacar es que la zona de baja velocidad (representada en color azul) ubicada a la altura de la admisión disminuye conforme aumenta el régimen operativo. Esto indica que un flujo más rápido dota al vórtice de mayor energía, permitiendo que las partículas se integren adecuadamente al ciclón sin impactar contra el tubo central, evitando así una precipitación anticipada que afecte la separación. Finalmente, en el escenario de 25 m/s, la supresión del flujo descendente pude llegar a provocar el reingreso de partículas de gran tamaño hacia la corriente ascendente central, mermando drásticamente la eficiencia del equipo.

El análisis de la velocidad radial muestra que en la zona inferior de la pared del buscador de vórtices (*vortex finder*) se concentra una velocidad bastante alta. Esta condición produce un flujo que va hacia el centro del equipo y que arrastra sobre todo las partículas finas hacia el desecho. Al revisar los contornos justo a la altura de la tubería de entrada, detectamos una zona donde las partículas ganan un impulso radial bastante fuerte. Esta energía cinética

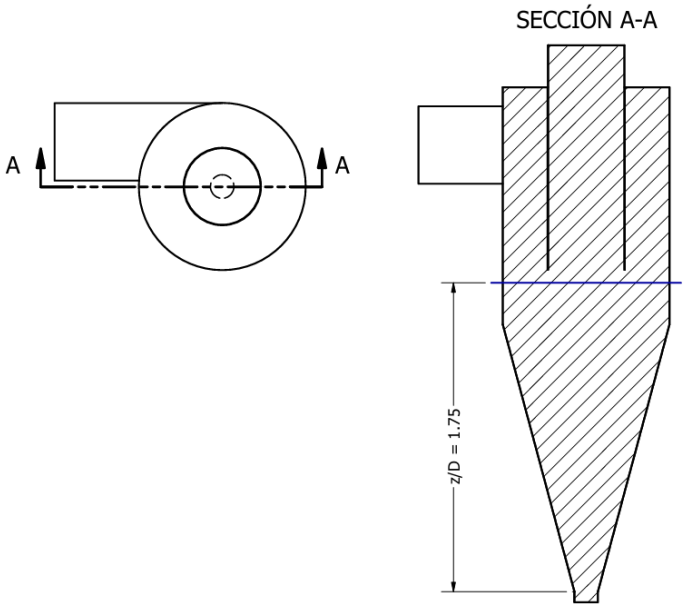
juega un papel decisivo en el proceso. Dependiendo de la masa y la inercia que tenga cada partícula de pintura, esa fuerza radial es la encargada de empujarlas para que se acoplen ordenadamente dentro del remolino de aire, o bien, de forzarlas a precipitarse contra las paredes metálicas del equipo.

Por su parte, cuando pasamos a analizar el perfil de velocidad tangencial, observamos un comportamiento aerodinámico muy particular en el centro del ciclón. El núcleo del aire gira en bloque, moviéndose prácticamente como si fuera un cuerpo sólido. A partir de ese eje central, conforme el flujo se va abriendo camino hacia los costados, notamos que su velocidad de rotación empieza a acelerarse cada vez más hasta topar con la pared. La velocidad tangencial máxima se encuentra en la parte inferior del tubo buscador de vórtice, pero al aumentar la velocidad de entrada, esta zona de alta intensidad disminuye su área, lo que crea un campo de velocidades más uniforme debajo del conducto. Si bien la fuerza centrífuga de separación se induce principalmente por la componente tangencial, ésta no actúa aislada. De ahí que para poder predecir el comportamiento real del separador se haga necesario integrar este análisis con las características aerodinámicas de los contorno axiales y radiales discutidos anteriormente.

Para la obtención de los perfiles de velocidad, se definió una línea de muestreo a una altura adimensional de z/D = 1.75, medida desde la sección inferior de la región cónica. Esta ubicación estratégica fue seleccionada con el propósito de capturar información detallada del comportamiento del flujo en el cuerpo del separador y en la zona cercana al tubo buscador de vórtice.

Figura 12

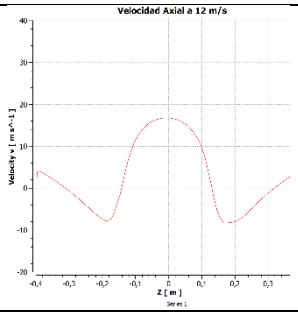
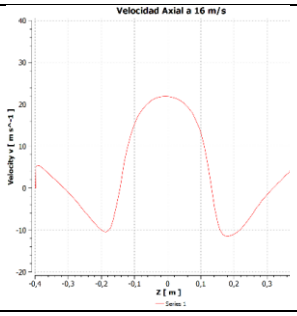
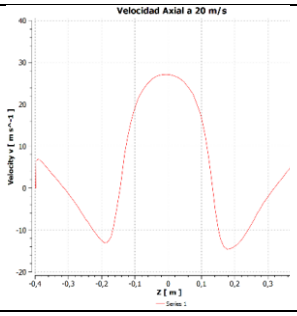
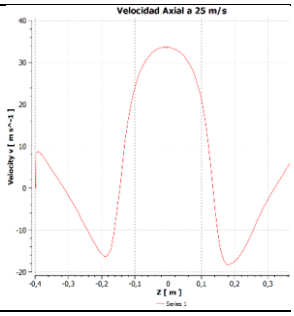
Representación geométrica de la línea de extracción de datos para los perfiles de velocidad

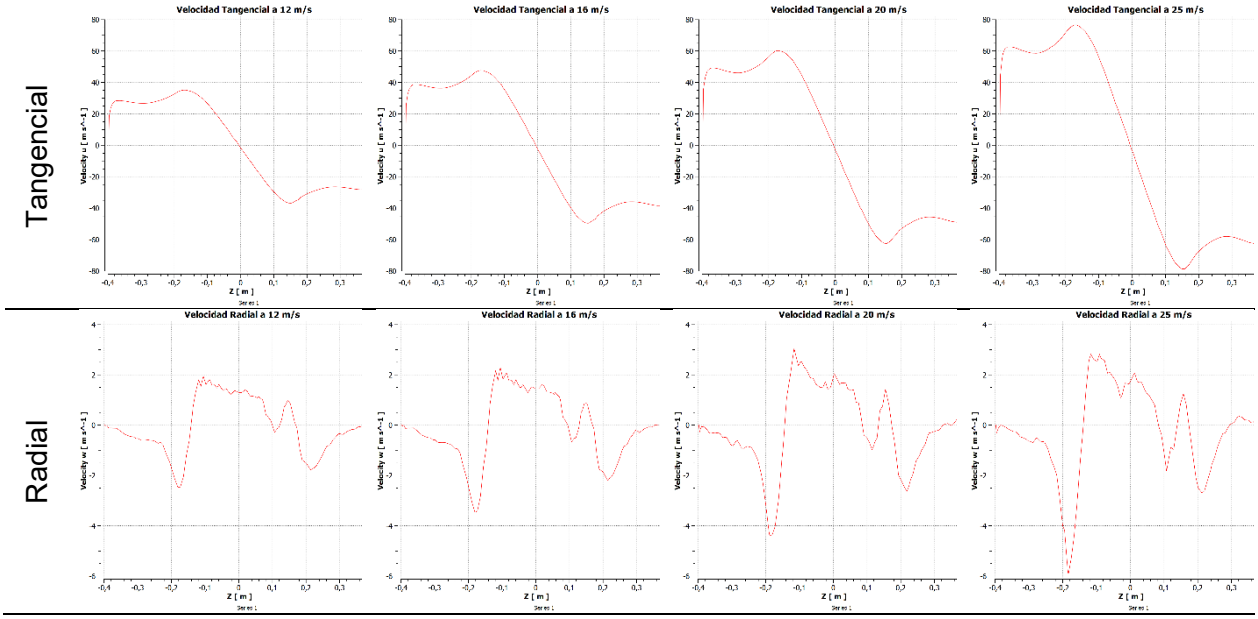


En dicha posición transversal, se obtuvieron los perfiles de velocidad axial, radial y tangencial correspondientes a las diferentes velocidades de entrada evaluadas (12, 16, 20 y 25 m/s) expuestas en la Tabla 12. Con el propósito de facilitar un análisis comparativo directo, se estandarizó la escala en todas las representaciones gráficas. Esta homogeneidad visual resulta indispensable para correlacionar y contrastar directamente el incremento de la magnitud cinemática local en esa sección frente al aumento del flujo de inyección.

Tabla 12

Comportamiento comparativo de los perfiles de velocidad frente a la variación en la velocidad de entrada

	12 m/s	16 m/s	20 m/s	25 m/s
Axial				



En el perfil de velocidad axial se observa de manera marcada la estructura del doble vórtice coaxial. En esta se refleja correctamente el flujo ascendente en la región central, que coincide con la ubicación geométrica del tubo buscador de vórtice, así como los valores negativos en las zonas laterales, correspondientes al flujo descendente de la pintura en polvo. La mayor velocidad de descenso del material se registró en el escenario de 25 m/s de entrada, alcanzando una magnitud aproximada de 18 m/s, lo cual concuerda con lo observado previamente en los mapas de contornos. Sin embargo, el aspecto más crítico a destacar es que la velocidad de ascenso en el núcleo central supera los 30 m/s. De alcanzarse este régimen cinemático en el equipo físico, la alta energía del flujo provocaría el ingreso prematuro de partículas de gran tamaño hacia el buscador de vórtice, mermando la eficiencia de recolección.

En cuanto al perfil de velocidad tangencial, se observa que en todos los escenarios evaluados la magnitud nula (0 m/s) coincide exactamente con el eje central del separador ciclónico (origen de la escala). Al comparar el flujo desde un régimen inicial de 12 m/s hasta un límite superior de 25 m/s, las velocidades tangenciales máximas escalan de aproximadamente 35 m/s a 80 m/s, respectivamente. Aunque una mayor velocidad tangencial intensifica la separación de la fracción particulada de menor tamaño, esto requeriría que el ventilador

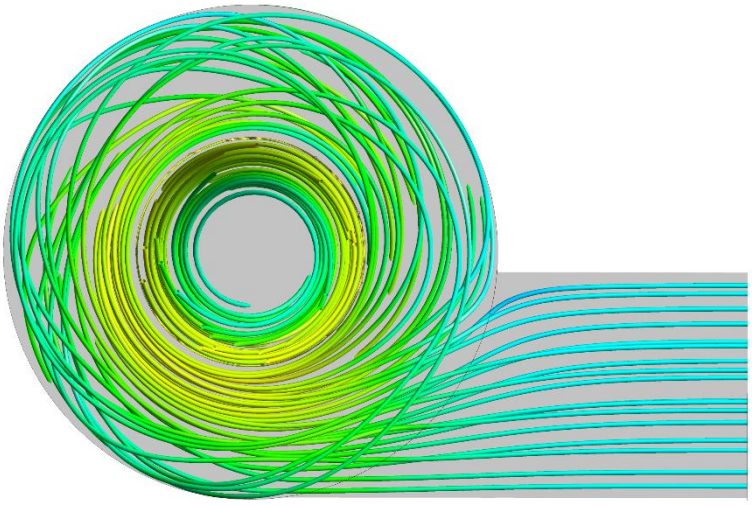
superara una caída de presión masiva en el sistema. Por otro lado, el escenario de 20 m/s presenta un óptimo equilibrio operativo, generando la fuerza centrífuga necesaria para clasificar eficazmente las partículas más finas sin alcanzar los valores extremos del límite máximo, ni penalizar drásticamente la demanda energética del extractor.

El análisis del perfil de velocidad radial muestra magnitudes mucho menores que las de los componentes axial y tangencial, con un comportamiento cinemático fuertemente oscilatorio. Las mayores inestabilidades y gradientes se encuentran en el núcleo central del separador ciclónico. Estos picos bruscos son una representación de las corrientes de convección radial, por las que el fluido portador corre con mucha intensidad hacia el eje central para emparejarse con el vórtice de escape. Al hacer que el modelo alcance el régimen límite de 25 m/s se ve que estas fluctuaciones se intensifican de forma crítica, con amplitudes que oscilan entre −4 m/s y 3 m/s. Esta inestabilidad cruzada origina que las partículas finas sean expulsadas del vórtice exterior y se arrastren prematuramente a la salida, lo que se traduce en una deficiencia notable en la eficiencia de separación del equipo.

En la evaluación de la sensibilidad resulta fundamental considerar la probabilidad de que las partículas incidentes choquen con el tubo buscador de vórtice transversalmente. Por medio de la simulación CFD se pudo comprobar que, una vez establecido el régimen estacionario del vórtice externo, la masa de aire desvía las partículas de su trayectoria rectilínea de ingreso. Este efecto de arrastre tangencial hace que el material particulado se acople casi inmediatamente al flujo helicoidal descendente, evitando así que la gran mayoría de las partículas impacten directamente contra las paredes del conducto de extracción central. Este comportamiento dinámico se ilustra detalladamente en la Figura 13.

Figura 13

Visualización de las líneas de trayectoria de la fase discreta en la entrada del ciclón



Con base en el comportamiento evidenciado en la simulación, se descartó la adaptación geométrica orientada a reducir la sección transversal de la entrada. La literatura académica no avala diseños en los que el flujo de las partículas de entrada se inyecte hasta el tubo buscador de vórtice, priorizando siempre configuraciones de inyección puramente tangencial. Aunque dicha reducción geométrica se planteó inicialmente para forzar este tipo de entrada, la comprobación de su escasa influencia sobre las trayectorias iniciales de las partículas motivó su exclusión definitiva. Finalmente, se concluyó que esta modificación representaba una intervención estructural altamente invasiva para el equipo, sin ofrecer un incremento significativo en la eficiencia de separación.

Propuesta de mejora

Antes de efectuar cualquier cambio físico en el separador, era necesario conocer cómo se comportaba aerodinámicamente el equipo en condiciones reales de trabajo. Con ese fin se programó una intervención en la planta durante el fin de semana, tiempo durante el cual se montó el hardware de instrumentación y se recogieron los datos operativos del variador de frecuencia directamente en línea. Al medir las velocidades en las secciones de entrada y salida,

se pudo cuantificar el margen de mejora del equipo y, al mismo tiempo, comparar la simulación teórica con la realidad física del proceso.

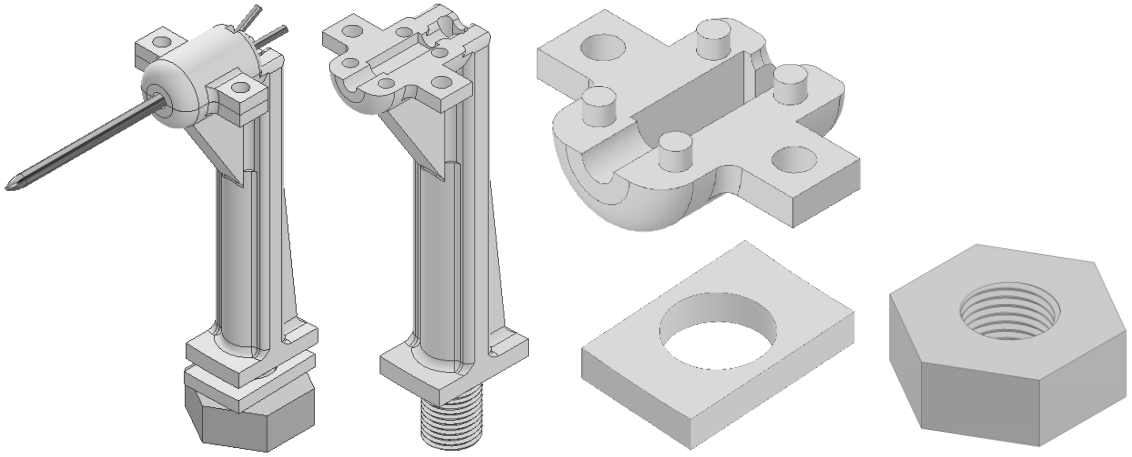
Diseño de soportes para tubos Pitot

Para que el registro de velocidad del aire fuese confiable, los sensores debían funcionar sin generar turbulencias adicionales en el fluido. Para ello se diseñaron soportes estructurales específicos que aseguren los tubos Pitot y guíen las líneas neumáticas a los sensores de presión diferencial.

El diseño de estas piezas fue una respuesta a las limitaciones, netamente prácticas, del entorno industrial. Una intrusión excesiva en la tubería alteraría las lecturas, por ello el orificio de inserción se limitó al diámetro mínimo funcional. Además, para evitar filtraciones que disminuyeran la capacidad de succión del extractor, se ha modelado la base del acople copiando exactamente la curvatura de los conductos de la planta, garantizando un sellado totalmente hermético una vez instalado. Con el propósito de evitar la pérdida de capacidad de succión del ventilador y mitiga las vibraciones mecánicas que podrían fracturar la pieza o inducir ruido en la adquisición de datos. En la Figura 14 se observa el diseño con dichas características.

Figura 14

Diseño CAD del soporte estructural para la instrumentación del tubo Pitot.

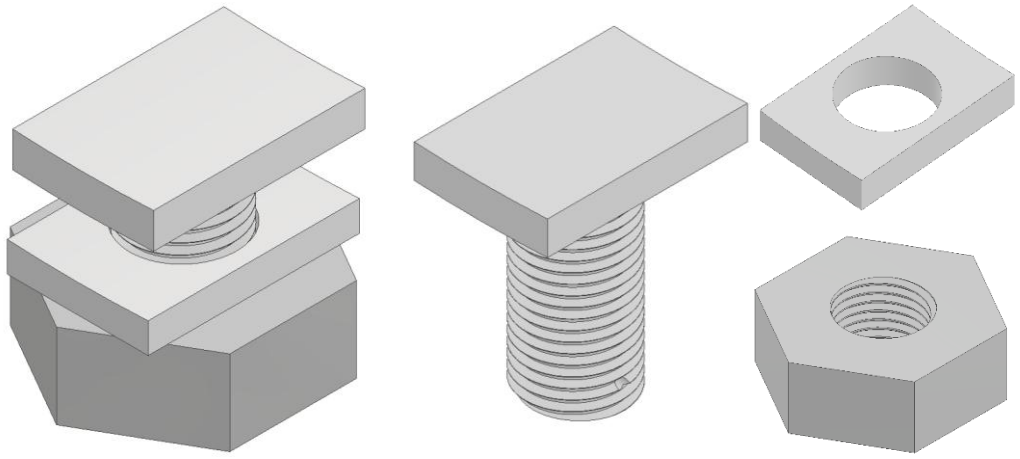


Nota. La utilización de estos soportes se restringe a la ejecución de pruebas aerodinámicas en vacío (sin carga de material particulado), con el objetivo de prevenir la obstrucción de las tomas de presión por acumulación de pintura en polvo.

Además, una vez concluida la fase de adquisición de datos y retirada la instrumentación, es imperativo sellar las perforaciones de acceso para evitar pérdidas de presión en el sistema. Para cumplir con este propósito, se diseñó una variante del acople que actúa como elemento obturador. Este componente permite restaurar la hermeticidad del conducto durante la operación continua del separador, tal como se detalla en la Figura 15.

Figura 15

Diseño CAD del elemento obturador para el sellado de las tomas de medición.



Diseño del sistema de instrumentación y acondicionamiento de señal

El transductor MPXV5004DP lee presiones en un rango bastante estrecho, de apenas 0 a 3.92 kPa. Al tener un comportamiento ratiométrico, es un sensor extremadamente delicado frente a lo que ocurre a su alrededor. Cualquier vibración mecánica del equipo, pequeñas fluctuaciones en el voltaje o campos electromagnéticos cercanos contaminan la señal de inmediato, volviendo muy inestable la lectura final. De hecho, en las primeras pruebas intentamos capturar los datos armando el circuito sobre una placa temporal (protoboard). Duramos poco con ese montaje, nos dimos cuenta rápido de que era imposible trabajar así.

Esa falta de aislamiento físico atrapaba demasiada interferencia y arruinaba por completo la precisión del registro, obligándonos a buscar una solución mucho más robusta. Esto nos llevó a diseñar una placa de circuito impreso (PCB). Con esta implementación, no sólo conseguimos una robusta y compacta adquisición de datos, sino que también protegemos la señal analógica frente a interferencias externas, antes de realizar la conversión digital.

Para desarrollar el hardware se partió del análisis exhaustivo de las especificaciones operacionales del transductor alimentado a un voltaje nominal de 5 VDC. En este caso el dispositivo entrega una señal analógica que varía entre 1 V y 4.9 V alcanzando este último valor cuando el sistema de instrumentación llega a su presión máxima de trabajo de 3.92 kPa.

El microcontrolador ESP32 cuenta con un módulo ADC (convertidor analógico-digital) que solo admite rangos de tensión entre 0 V y 3,3 V. Por lo tanto, una conexión directa del transductor no solo provocaría la saturación inmediata del canal, sino que comprometería la integridad física del pin por sobrevoltaje. Para resolver esta incompatibilidad, se optó por implementar un divisor de tensión configurado con las resistencias $R_1 = 1.8\ k\Omega$ y $R_2 = 3.3\ k\Omega$. Aplicando la ecuación del divisor de voltaje. Se verifica la atenuación de la señal:

$$V_o = V_{out}\left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)$$

Se sustituye el escenario crítico de entrada $V_{out} = 4.9\ V$

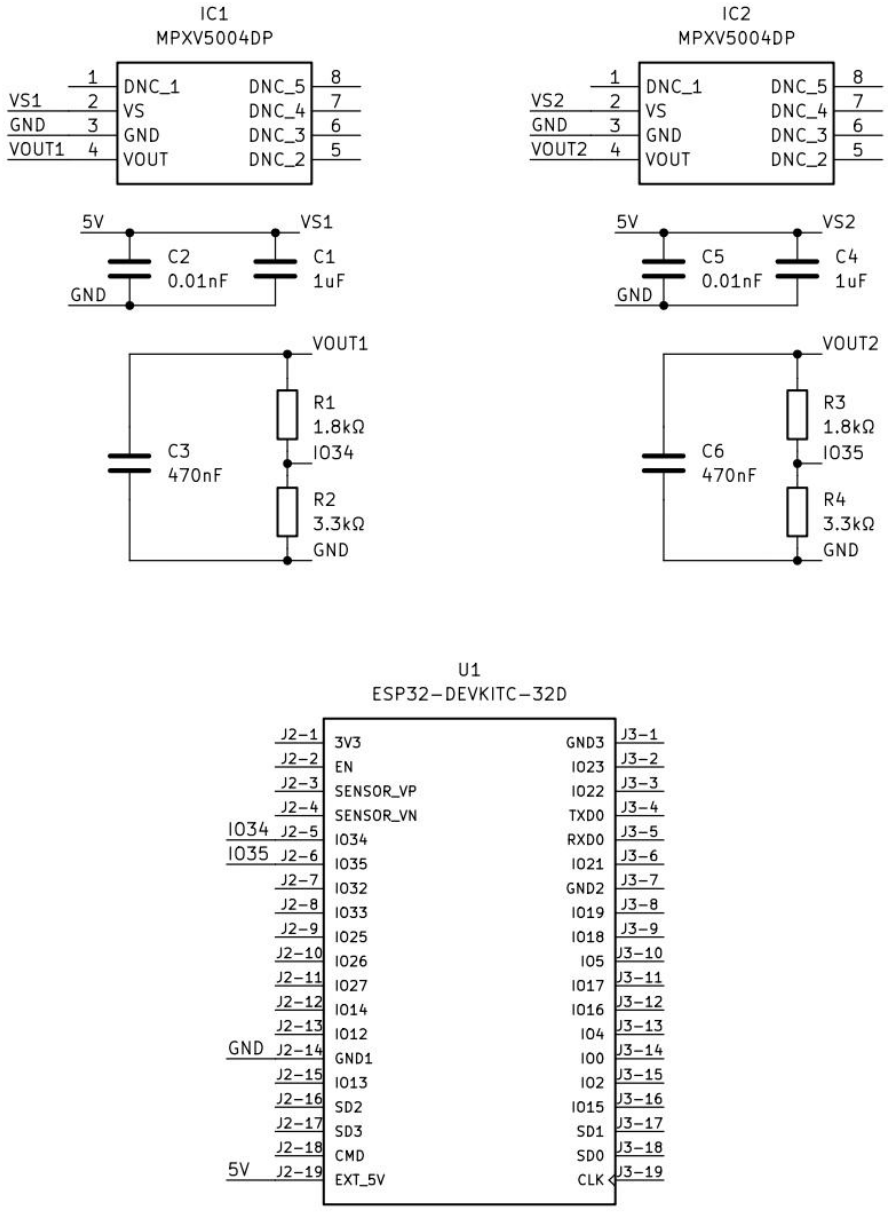
$$V_o = 4.9\ V\left(\frac{3.3\ k\Omega}{1.8\ k\Omega + 3.3\ k\Omega}\right) = 3.17\ V$$

Al bajar el límite superior a 3.17V, se logra utilizar el 96% de la escala del ADC, maximizando la resolución y la precisión de la lectura por parte del microcontrolador.

Para reducir las perturbaciones, se montó el circuito recomendado por el fabricante: dos condensadores de $1\ uF$ $0.01\ uF$ en paralelo sobre la alimentación de 5V para suprimir los transitorios y un condensador de $470pF$ en la salida que actúa de filtro pasa-bajas contra interferencias antes del divisor de tensión.

Figura 16

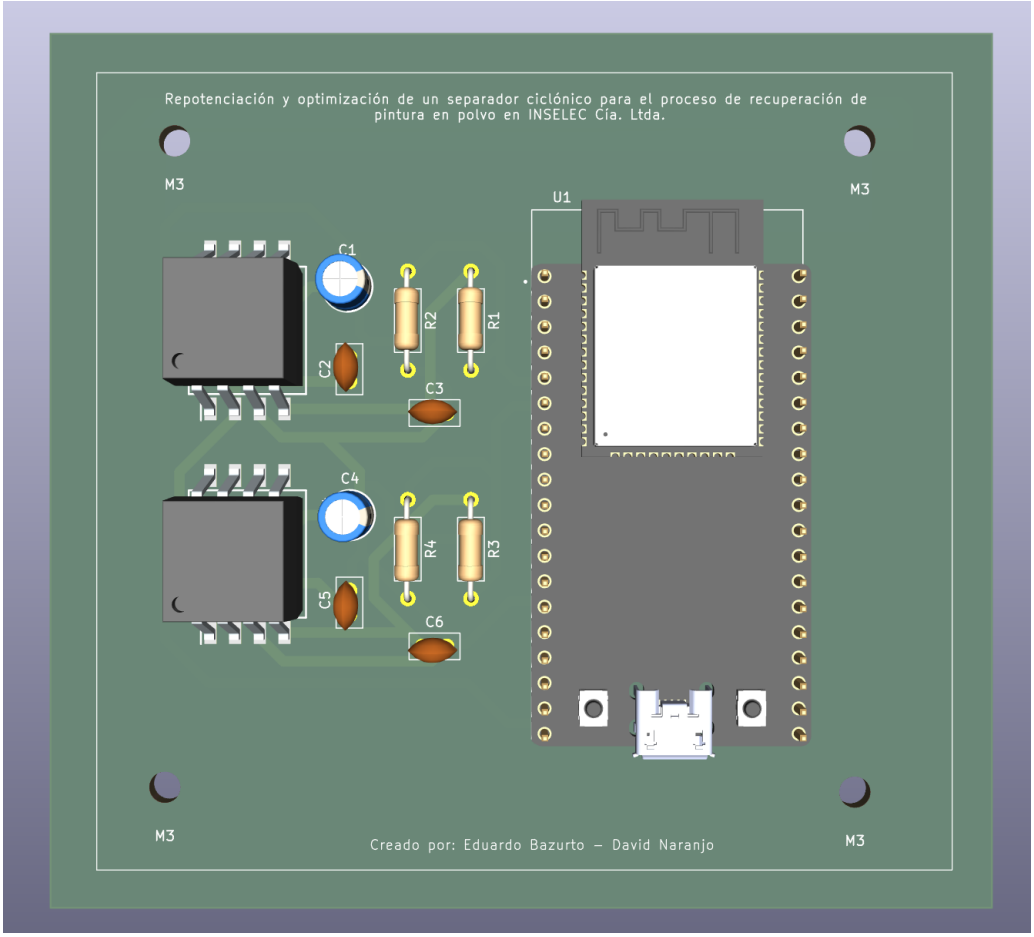
Diseño electrónico y de acondicionamiento de señal para el transductor MPXV5004DP



A partir del diseño electrónico, se diseñó y ruteó la PCB del sistema de adquisición de datos, ubicando los filtros pasivos y divisores de tensión cerca de los transductores MPXV5004DP y las entradas del microcontrolador para reducir el ruido eléctrico en las mediciones, tal como se ilustra en la Figura 17.

Figura 17

Vista tridimensional de la PCB para el sistema de instrumentación y acondicionamiento de señal



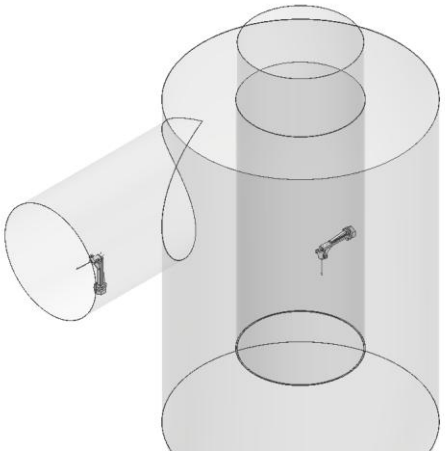
Nota. La placa desarrollada incluye perforaciones en las esquinas para una sujeción mediante tornillería M3.

Integración de sensores

Con el propósito de caracterizar el comportamiento cinemático del flujo, se implementó la instalación de las sondas Pitot junto con sus respectivos soportes de sujeción. Estos elementos se ubicaron estratégicamente en el ducto de admisión y en el tubo buscador de vórtice (*vortex finder*), permitiendo registrar de manera precisa las variaciones de velocidad en las secciones más críticas del equipo, tal como se ilustra en la Figura 18.

Figura 18

Esquema de localización de los tubos Pitot para la adquisición de datos de velocidad

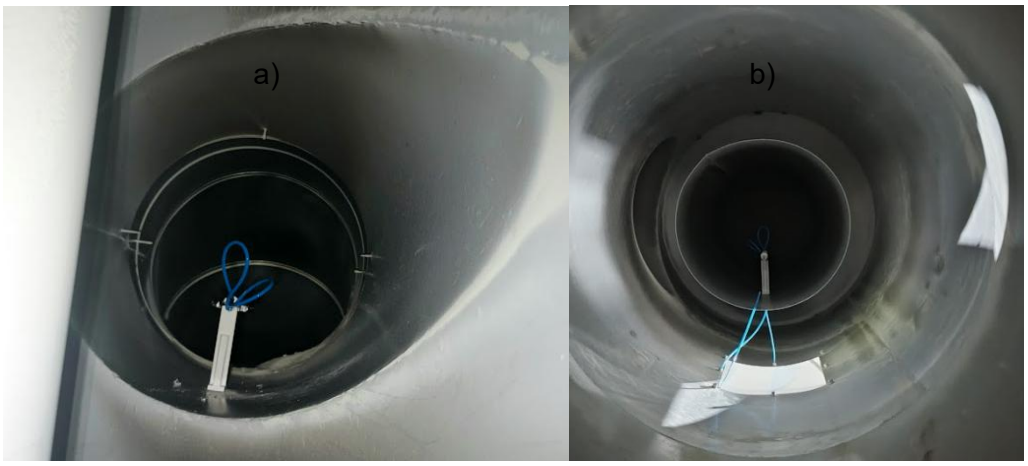


La manufactura de los soportes instrumentales previamente diseñados se llevó a cabo mediante impresión 3D, utilizando filamento PLA con un porcentaje de relleno (*infill*) del 15% y asegurando su ensamble estructural mediante tornillería milimétrica M3. Posteriormente, durante la intervención en la planta, se ejecutaron las perforaciones estratégicas tanto en el ducto de entrada como en el tubo buscador de vórtice (*vortex finder*). Estas tomas de presión se instalaron con el objetivo de registrar la velocidad aerodinámica del aire y monitorear su respuesta frente a la modulación de la frecuencia del motor.

Para prevenir interferencias en la medición en los datos del tubo Pitot ubicado dentro del separador ciclónico, la presión captada se canalizó hacia los sensores electrónicos de la placa PCB utilizando mangueras neumáticas. La rigidez de estas líneas de transmisión evita estrangulamientos o colapsos mecánicos ocasionados por la fuerza del flujo o durante el cierre de las compuertas del equipo. Finalmente, el enrutamiento neumático se configuró de manera curva (en forma de bucle), con el propósito de garantizar un flujo libre de perturbaciones y evitar caídas de presión en la señal física antes de que esta sea registrada por los equipos. Esta implementación se puede observar en la Figura 19.

Figura 19

Sondas Pitot instaladas junto con los soportes mecánicos desarrollados a) tubo de entrada y b) tubo buscador de vórtice



Los tubos Pitot se orientaron de forma paralela al eje axial de las tuberías, debido a que el flujo aerodinámico tiende a seguir la trayectoria geométrica de los conductos. Aunque en la sección del tubo buscador de vórtice (*vortex finder*) el fluido experimenta un comportamiento dinámico más complejo y desvíos en sus líneas de corriente, se preservó la misma alineación axial con el propósito de estandarizar el protocolo de montaje y asegurar la consistencia en la adquisición de los datos.

Plan de intervención y jerarquización de mejoras

Al definir cómo íbamos a modificar el separador, nos topamos con una restricción industrial innegociable: debíamos alterar lo menos posible el día a día de la línea de producción. Por esta razón, organizamos los cambios operativos y geométricos en escalones, aplicando siempre primero las soluciones que requirieran menos desarme. Este orden de ejecución no fue una decisión al azar, lo armamos cruzando directamente los consejos de la literatura técnica con los problemas de flujo que detectamos al simular el equipo en CFD. El propósito de este enfoque progresivo es netamente práctico: si un ajuste temprano logra la eficiencia de separación requerida, se descartan automáticamente las modificaciones

estructurales más severas. De esta manera, se evitan desmontajes y tiempos de inactividad innecesarios que perjudiquen la rentabilidad de la planta.

1. **Regulación de la velocidad de entrada:** La primera intervención consistirá en el ajuste de la velocidad aerodinámica de inyección a lo calculado previamente. Una vez caracterizado el perfil real con la instrumentación, se procederá a modular el flujo. Este ajuste dinámico se ejecutará mediante la implementación de un Variador de Frecuencia (VDF) acoplado al extractor, permitiendo alcanzar la velocidad óptima de arrastre validada en la simulación sin alterar la geometría del equipo.
2. **Reducción del diámetro del tubo localizador de vórtice:** Como segunda medida, en caso de requerir mayor eficiencia, se contempla la sustitución del tubo buscador de vórtice para disminuir su diámetro. En la práctica, el objetivo de esta modificación mecánica es acercar la relación dimensional del ciclón a los rangos óptimos comprobados en la literatura (entre 0.25 y 0.36). Al acoplar esta nueva geometría con la velocidad de flujo ya corregida, forzamos al sistema a capturar la mayor cantidad posible de pintura útil que, con el diseño original, terminaría perdiéndose en el desecho.
3. **Ajuste longitudinal del tubo localizador de vórtice:** La tercera mejora consistirá en recortar la longitud de inserción del tubo buscador. Al acortar esta medida, reducimos drásticamente el riesgo de un cortocircuito aerodinámico. En la práctica, esto impide que la corriente de aire se lleve por equivocación las partículas gruesas (nuestra materia prima) hacia la tubería de desecho, forzando al sistema a expulsar únicamente el polvo fino inservible.
4. **Ampliación del diámetro de descarga cónica:** Dejamos como último recurso el rediseño de la base del cono, por ser la intervención más invasiva sobre la estructura del equipo. Nuestra proyección aquí fue ensanchar el hueco de descarga hasta llevarlo a una relación de 0.6 respecto al diámetro del cuerpo cilíndrico, garantizando así la máxima recuperación posible de pintura.

Capítulo IV: Implementación y validación experimental

Selección de los componentes

El dimensionamiento y la selección de los dispositivos descritos en esta sección sustentan la ejecución de la primera etapa del cronograma de repotenciación. En estricto apego a la jerarquización de intervenciones de mínima invasividad operativa.

Selección del variador de frecuencia (VDF)

Para dimensionar y elegir el variador de frecuencia adecuado, tomamos como punto de partida los datos de placa del motor que ya estaba instalado en la planta. Basamos nuestra selección estrictamente en sus especificaciones nominales de operación, las cuales dejamos resumidas en la Tabla 13 para tener una referencia clara de los límites de trabajo del equipo.

Tabla 13

Especificaciones del motor MAL-38F2653-2

Parámetro	Magnitud
Frecuencia	60 Hz
Normativa	IEC 60034-1
Frecuencia	60 Hz
Régimen de Servicio	S1
Grado de Protección	IP 55
Potencia Nominal (kW)	6.3 kW
Potencia Nominal (HP)	8.6 HP
Velocidad de Giro	3480 min^{-1} (RPM)
Factor de Potencia	0.83
Voltaje en Delta (Δ)	220 V
Voltaje en Estrella (Y)	380 V
Corriente en Delta (Δ)	21.9 A
Corriente en Estrella (Y)	12.7 A
Eficiencia Energética	Eff: IE1
Peso	26 kg

Debido a que la carga principal se conectará en Delta (Δ), el equipo debe seleccionarse para cubrir una tensión de 220 V trifásica, una corriente demandada de 21.9 A y una potencia mecánica de 6.3 kW

Para dar cumplimiento a los requerimientos de operación, se seleccionó el variador de frecuencia Scheneider Altivar ATV630D11M3 que se ilustra en la Figura 20 y cuyas especificaciones técnicas se describen en la Tabla 14 a fin de demostrar la compatibilidad del equipo con el motor y proveer las restricciones de montaje y ventilación para el posterior diseño de la envolvente.

Figura *20*

Variador de frecuencia Scheneider Altivar ATV630D11M3



Tabla 14

Especificaciones del VFD Altivar ATV630D11M3

Parámetro	Valor
Voltaje de Salida	200 a 240 V
Corriente de Salida	46 A
Corriente Máxima de Entrada	39.3 A
Protección Térmica del Motor	Integrada mediante algoritmo I^2t
Dimensiones del Chasis	546 mm × 211 mm × 232 mm
Espacio de Ventilación	≥ 100 mm (Arriba / Abajo)

Dimensionamiento de contactor

El contactor es necesario antes del motor porque su función es actuar como un interruptor electromecánico de potencia, capaz de conectar y desconectar el circuito de alimentación del motor de forma segura, repetida y controlada, algo que un interruptor manual convencional no puede hacer de forma confiable en aplicaciones industriales. Se seleccionó el contactor Schneider Tesys D - 3P(3 NA) - AC-3 - <= 440 V 25 A - 220 V CA, bobina 220 V. La Figura 21 exhibe la distribución externa de los bornes del componente, a su vez, la Tabla 15 sintetiza sus especificaciones eléctricas y mecánicas de diseño cuya información muestra su viabilidad en el sistema tomando como punto de partida la corriente que va a manejar: al conectarse el motor en Delta a 220 V, la línea trabaja con 21.9 A nominales. Dado que se tiene un motor de jaula de ardilla hay que usar la categoría AC-3, pensada justamente para la corriente al arranque de 5 a 7 veces la corriente nominal.

Figura 21

Contactor Tesys D - 3P(3 NA) - AC-3 - <= 440 V 25 A - 220 V CA bobina



Tabla 15

Especificaciones del Contactor Tesys D - 3P(3 NA) - AC-3 - <= 440 V 25 A - 220 V CA bobina

Parámetro	Valor
Potencia del motor asociado	7,5 hp

Corriente nominal (I_e)	25 A
Corriente Máxima de Entrada	39.3 A
Tensión nominal	200/208 V CA (50/60 Hz)
Durabilidad eléctrica	1,65 millones de ciclos
Categoría de empleo	AC-3

***Dime*nsionamiento de protecciones**

La normativa NEC 430 establece de manera estricta que, para motores de aplicaciones generales, los valores nominales de corriente para el dimensionamiento de conductores, interruptores automáticos y fusibles contra cortocircuito y falla a tierra deben extraerse obligatoriamente de las tablas de la norma en lugar de utilizar la corriente real grabada en la placa de características del equipo. Por ello, se usa la *Tabla 16* que especifica corriente a plena carga de motores trifásicos de corriente alterna, presentada a continuación:

Tabla 16

Corriente a plena carga de motores trifásicos de corriente alterna

HP	**Rotor tipo jaula de ardilla de inducción y rotor devanado (amperios)**						
	115 V	200 V	208 V	230 V	460 V	575 V	2300 V
½	4.4	2.5	2.4	2.2	1.1	0.9	-
¾	6.4	3.7	3.5	3.2	1.6	1.3	-
1	8.4	4.8	4.6	4.2	2.1	1.7	-
1½	12	6.9	6.6	6	3	2.4	-
2	13.6	7.8	7.5	6.8	3.4	2.7	-
3	-	11	10.6	9.6	4.8	3.9	-
5	-	17.5	16.7	15.2	7.6	6.1	-
7½	-	25.3	24.2	22	11	9	-
10	-	32.2	30.8	28	14	11	-
15	-	48.3	46.2	42	21	17	-
20	-	62.1	59.4	54	27	22	-
25	-	78.2	74.8	68	34	27	53
30	-	92	88	80	40	32	63

Nota: La tabla presentada corresponde a un fragmento de la Tabla 430-250 de la normativa NEC 430

Para el dimensionamiento de protecciones se usará el valor de tensión de 230 V: Para un motor de 10 HP, se indica 28 A. Dado que no se tiene una clasificación tipo NEMA en la placa del motor, se deducirá a partir de su deslizamiento.

$$Deslizamiento\ (\%) = \frac{n_s - n_r}{n_S} \times 100\%$$

Donde:

- $n_s = Velocidad\ síncrona\ en\ RPM$
- $n_r = Velocidad\ real\ del\ motor\ en\ RPM$

Se tendrá la siguiente velocidad síncrona n_s para un motor de 2 polos a 60 Hz:

$$n_s = \frac{120 \times f}{polos}$$

$$n_s = \frac{120 \times 60}{2} = 3600\ RPM$$

Por lo tanto, el deslizamiento es:

$$Deslizamiento\ (\%) = \frac{3600 - 3480}{3600} \times 100\%$$

$$Deslizamiento\ (\%) = 3.33\%$$

El motor corresponde a un diseño NEMA B porque su deslizamiento es menor al 5%, muestra alta eficiencia y un factor de potencia de 0.83 a plena carga. Por lo tanto, en la Tabla 17 se obtiene el porcentaje en corriente nominal para la selección de protecciones contra cortocircuitos:

La protección contra cortocircuito y falla a tierra debe soportar la corriente de arranque del motor. Para su dimensionamiento, NEC 430.52(C)(1) exige aplicar los porcentajes máximos normativos sobre la corriente de las tablas, según el tipo de motor e interruptor seleccionado. A continuación, se detalla la Tabla 17 utilizado para definir estos límites normativos:

Tabla 17

Ajuste máximo de los dispositivos de protección contra cortocircuitos y falla a tierra para circuitos derivados de motores

Tipo de motor	**En porcentaje de la corriente nominal**			
	Fusible **sin retardo de tiempo**	Fusible de dos elementos **(con retardo de tiempo)**	Interruptor **automático de disparo instantáneo**	Interruptor **automático de tiempo inverso**
Motores **monofásicos**	300%	175%	800%	250%
Motores **polifásicos de corriente alterna distintos a los de rotor** Devanado	300%	175%	800%	250%
De jaula de ardilla: diferentes de los de diseño **B energéticamente eficientes**	300%	175%	800%	250%
De diseño B **energéticamente eficientes**	300%	175%	1100%	250%
Sincrónicos	300%	175%	800%	250%
Con **rotor devanado**	150%	150%	800%	150%
De **corriente continua (tensión constante)**	150%	150%	250%	150%

Nota: Obtenido de la normativa NEC 430

Se usará un interruptor automático de disparo instantáneo (disyuntor magnético) por lo tanto:

$$I_{AIDI} = 11 I_n$$

$$I_{AIDI} = 11 \times 28\ A = 308\ A$$

Se usará el disyuntor magnético *ComPacT NSX400F MicroLogic 1.3 M 320 A 3P 3D* del fabricante Schneider Electric, de este modo, se ilustra en la Figura 22 su robusta estructura física, mientras que la **Tabla *18***

Especificaciones del ComPacT NSX400F MicroLogic 1,3 M 320 A 3 P 3DTabla 18 sintetiza sus parámetros eléctricos críticos y límites nominales de operación cuya información se incluye para demostrar de forma cuantitativa la idoneidad del equipo, evidenciando que su corriente nominal de 320 A a 65 ºC superan con absoluta seguridad la corriente planteada en el diseño.

Figura 22

Interruptor Automático ComPacT NSX400F MicroLogic 1.3 M 320 A 3P 3D



Posee las siguientes características:

Tabla 18

Especificaciones del ComPacT NSX400F MicroLogic 1,3 M 320 A 3 P 3D

Parámetro	Valor
Corriente Nominal (I_n)	320 A a 65 °C
Capacidad de Corte (I_{cu})	40 kA a 220/240 Vca
Unidad de Control e Historial	MicroLogic 1.3 M
Ajuste de Corto Retraso (I_{sd})	9 regulaciones desde 1600 A hasta 4160 A
Resistencia a Picos (U_{imp})	8 kV

La protección contra sobrecarga para el motor de servicio continuo se rige bajo la norma NEC 430.32(A)(1), la cual establece que los motores deben protegerse contra calentamientos

excesivos debido a sobrecargas y fallas al arrancar. Sin embargo, al emplearse un variador de frecuencia como método de control, la normativa en su sección NEC 430-124(A) establece que, si el equipo de conversión de potencia incluye protección electrónica contra sobrecarga de forma interna, no se exigirá un dispositivo de protección térmico físico adicional en el circuito.

Por lo tanto, la función de protección térmica se delega por completo al firmware del variador Altivar Process ATV630D11M3 mediante su algoritmo inteligente I^2t. Este parámetro de corriente térmica del motor (I_{tH}) se configurará al 100% de la corriente nominal real de la placa del motor $I_{real} = 21.9\ A$.

Dimensionamiento de los conductores

La sección NEC 430.22 establece que los conductores que alimentan a un solo motor en una aplicación de servicio continuo deben tener una ampacidad no menor al 125% de la corriente a plena carga determinada por la sección 430.6(A)(1). Tomando la corriente de diseño del motor en conexión Delta, se calcula la ampacidad requerida:

$$Ampacidad = 1.25 \times I_n$$

$$Ampacidad = 1.25 \times (21.9\ A) = 27.38\ A$$

Para elegir del calibre y recubrimiento del conductor se usa la Tabla 19, que detalla la capacidad de conducción de corriente de los conductores de cobre bajo distintos límites de temperatura. Esta tabla es de vital importancia, ya que establece el criterio normativo indispensable para la adecuada selección del calibre y el tipo de recubrimiento del conductor de manera precisa.

Tabla 19

Ampacidades de conductores aislados con no más de tres conductores portadores de corriente en canal, cable o tierra

Calibre AWG o kcmil	**Cobre**		
	Tipos **TW, UF**	Tipos **RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, XHWN, USE, ZW**	Tipos TBS, SA, **SIS, FEP, FEPB, MI, PEA, RHH, RHW-2, THHN, THHW, THWN-2, USE-2,**

			XHH, XHHW, XHHW-2, XHWN, XHWN-2, XHHN, Z, ZW-2
	60°C **(140°F)**	75°**C (167°F)**	90°C **(194°F)**
16*	10	15	20
14*	15	20	25
12*	20	25	30
10*	30	35	40
8	40	50	55
6	55	65	75
4	70	85	95
3	85	100	115
2	95	115	130

Nota: La tabla presentada corresponde a un fragmento de la Tabla 430-16 para conductores de cobre de la normativa NEC 430

Dado que la INSELEC Cía. Ltda. se encuentra en Pifo, una zona fría y muy húmeda donde es común que se acumule agua por condensación dentro de las tuberías eléctricas. Por esta razón, elegimos un conductor de cobre con aislamiento THWN. Este recubrimiento es ideal para el proyecto porque sella el cable contra la humedad ambiental y no se vuelve quebradizo ni pierde sus propiedades con las bajas temperaturas de la parroquia.

Al revisar la tabla de conductores de cobre a 75 °C, vemos que el cable 12 AWG se queda corto para los 27.38 A que exige nuestro cálculo de ampacidad. Por lo tanto, se selecciona el calibre inmediato superior y adecuado para la instalación es:

- Calibre seleccionado: 10 AWG multifilar, soporta hasta 35 A a 75 °C.
- Aislamiento: THWN.

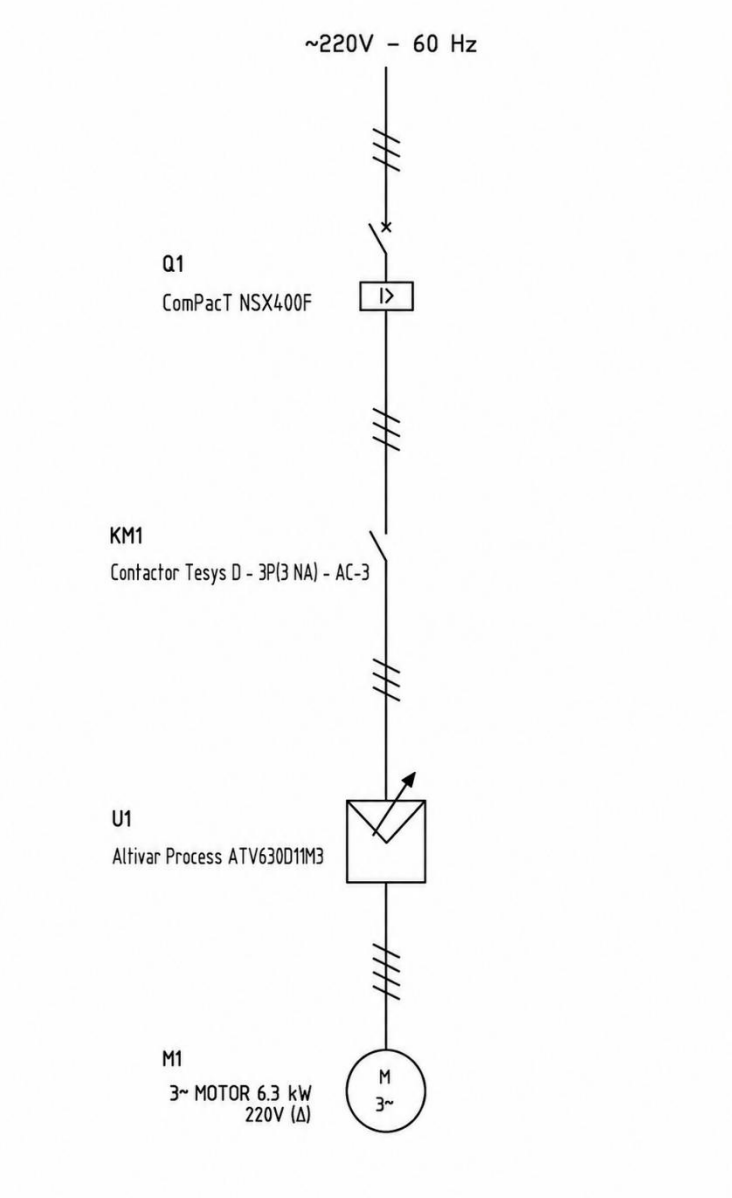
Diagrama Unifilar del Circuito de Potencia

Una vez calculados los conductores y seleccionadas las protecciones bajo los estrictos criterios del estándar NEC 430, se consolidó un diagrama unifilar presente en la Figura 23 que muestra de forma gráfica la jerarquía eléctrica y el flujo secuencial de la energía dentro del sistema representando visualmente y de manera clara la disposición de la etapa de fuerza,

actuando como la referencia definitiva para orientar el cableado físico de los componentes. Esta trayectoria comienza en la acometida trifásica y desciende de forma estructurada a través de los dispositivos de corte, maniobra y regulación, hasta alimentar finalmente al actuador principal.

Figura 23

Esquema unifilar de la etapa potencia y protecciones del sistema



El esquema ilustra los siguientes elementos:

- **Disyuntor Magnético (Q1):** Es la protección principal de la línea. Corresponde al modelo ComPacT NSX400F con unidad de disparo MicroLogic 1.3 M, cuya función es despejar de inmediato cualquier corriente de cortocircuito severa que pueda presentarse.
- **Contactor de Línea (KM1):** Cumple el rol de maniobra electromecánica del circuito. Se trata de un Contactor Tesys D - 3P(3 NA) - AC-3 - <= 440 V 25 A - 220 V CA.
- **Variador de Frecuencia (U1):** El Altivar Process ATV630D11M3 se encarga de controlar la velocidad del actuador ajustando de forma precisa la frecuencia y el voltaje, y además asume la protección térmica electrónica del motor.
- **Motor de Inducción (M1):** Es el actuador mecánico final del proceso, es decir, la carga principal del sistema. Corresponde al motor trifásico de 6.3kW conectado en Delta

Dimensionamiento de la envolvente

Para dimensionar la envolvente se procede a recopilar las dimensiones físicas y la disipación térmica de cada equipo que se describen en la siguiente Tabla 20 cuya información permite cuantificar el espacio requerido y el calor total acumulado que se liberará dentro de la envolvente.

Tabla 20

Dimensiones físicas y disipación térmica de los equipos

Componente	Referencia	Dimensiones	Disipación térmica
Q1	ComPacT NSX400F, 3P, MicroLogic 1.3 M	165×255×110 mm	5 W
KM1	TeSys D LC1D25, 3P(3 NA), 220 V CA	45×91×86 mm	15 W

U1	Altivar Process ATV630D11M3, 11 kW, IP21	211×546×232 mm	514 W

Además, mediante la Tabla 21 se definieron los factores externos que impactan en el funcionamiento del tablero, describiendo detalladamente las condiciones ambientales específicas del sitio de instalación y su influencia directa en la ingeniería del proyecto.

Tabla 21

Condiciones del sitio de instalación de la envolvente y su implicación en el diseño

Parámetro	Condición del sitio	Implicación en el diseño
Ambiente	Interior, planta industrial, con presencia de polvo y humedad	IEC 60204-1 exige grado de protección IP54 mínimo
Montaje del variador	No se dispone de compartimento o pared exterior para el kit de montaje pasante del variador	Toda la disipación térmica del variador permanece dentro de la envolvente; se descarta el flange como estrategia de enfriamiento
Altitud	INSELEC Cía. Ltda., Parque Industrial de Itulcachi, 2650–2660 m s.n.m.	Supera el límite de 1000 m s.n.m. de la condición de referencia de IEC 60204-1 lo que obliga a aplicar factores de corrección sobre Q1, KM1, U1 y el sistema de enfriamiento

Conforme a IEC 60204-1 cláusula 11.3 y las condiciones ambientales se selecciona el grado de protección IP55, protección contra polvo en cantidad perjudicial e ingreso de agua en forma de salpicaduras desde cualquier dirección.

Se calcula el calor total generado dentro de la envolvente como la suma de las disipaciones individuales

$$P_{total} = P_{Q1} + P_{KM1} + P_{U1}$$

$$P_{total} = 5 + 15 + 514 = 534\,W$$

Se calcula la capacidad de disipación natural de las paredes de la envolvente mediante el método simplificado de IEC 60890:

$$P_{disipada} = kA\Delta T$$

Donde:

- k: coeficiente de transmisión térmica de la envolvente
- A: superficie efectiva de disipación m²
- ΔT: diferencia entre temperatura interna máxima admisible y temperatura ambiente exterior en grados Kelvin

Para una envolvente de piso de $0.6 \times 2 \times 0.5\, m$, se considera que la cara posterior queda contra la pared y no participa en el intercambio de calor con el ambiente, y que la cara inferior tampoco se toma en cuenta por estar apoyada en el soporte de fijación. Por tanto, la superficie efectiva corresponde a la cara frontal, las dos caras laterales y la cara superior:

- Frontal: $0.6\, m \times 2\, m = 1.2\, m^2$
- Posterior $0.6\, m \times 2.0\, m = 1.2\, m^2$
- 2 laterales: $2 \times (0.5\, m \times 2\, m) = 0.96\, m^2$
- Superior: $0.6\, m \times 0.4\, m = 0.24\, m^2$

Entonces la superficie efectiva de disipación es:

$$A = 1.2 + 1.2 + 2.0 + 0.3 = 4.7\, m^2$$

El ATV630D11M3 admite hasta 50 °C sin desclasificación térmica, mientras que la temperatura ambiente de diseño de la planta en Itulcachi es de 20 °C. Por tanto:

$$\Delta T = T_{Interna\ Admisible} - T_{Ambiente\ Exterior}$$

$$\Delta T = 50 - 20 = 30\, K$$

Dado que se usa chapa de acero pintado se tiene $k = 5.5\, W/m^2 \cdot K$ procedemos a calcular la potencia disipada por convección natural:

$$P_{disipada} = kA\Delta T$$

$$P_{disipada} = 5.5 \times 4.7 \times 30 = 776.5\, W$$

Puesto que $P_{disipada} = 776.5\, W > P_{total} = 534\, W$, se concluye que la envolvente, con las dimensiones resultantes del Paso 600 × 2000 × 500 mm con formato de piso es capaz de disipar por convección natural la totalidad del calor generado internamente, sin necesidad de un sistema de enfriamiento activo para cerrar el balance térmico. Esta conclusión es consistente con el método simplificado de IEC 60890, que por su naturaleza conservador tiende a subestimar la capacidad real de disipación de la envolvente.

Sin embargo, el cierre del balance térmico global no elimina por sí sólo la necesidad de un sistema de climatización, pues persiste un requisito funcional independiente: la planta de INSELEC Cía. Ltda. tiene un ambiente con polvo por el proceso de pintado electrostático y por el grado de protección IP54 la envolvente debe permanecer cerrada, sin rejillas abiertas al ambiente exterior. Cualquier ventilación necesaria para evitar la acumulación de calor localizado alrededor del ventilador interno del variador debe realizarse por un equipo que mantenga separados el aire exterior contaminado y el aire interior de la envolvente.

Por tanto, se descartan las rejillas de ventilación con filtro, porque comprometen el grado de protección y requieren un mantenimiento frecuente por saturación de partículas de pintura, así como los intercambiadores aire-aire pasivos, de menor margen de seguridad térmica frente a un equipo activo. Se escoge por tanto un climatizador sellado, de doble circuito de aire independiente, no como solución a un déficit, sino como mecanismo de intercambio de aire seguro frente al ambiente de polvo del proceso productivo, aportando además margen adicional frente a la posible concentración localizada de calor cerca del variador.

Dimensionamiento físico de la envolvente

Para el dimensionamiento físico se toman las dimensiones de cada componente de la Tabla 22 la cual detalla los espacios mínimos de montaje considerados. Para distribuir el espacio interior, optamos por acomodar los equipos en una sola columna vertical siguiendo la secuencia Q1–KM1–U1. Colocamos el disyuntor Q1 en la parte más alta, de esta forma, el operador tiene mejor acceso físico para maniobrar el interruptor y resulta mucho más fácil conectar los cables de la acometida principal. Justo debajo fijamos el contactor KM1, una posición intermedia y estratégica que nos permitió acortar la longitud del cableado de fuerza que baja hacia el variador. Finalmente, dejamos el variador U1 en la base del gabinete. Como es el componente más voluminoso y pesado del sistema, instalarlo al fondo ayuda a bajar el centro de gravedad, lo que le da mucha más firmeza y estabilidad mecánica a todo el ensamble.

Tabla 22

Espacios mínimos de montaje considerados

Concepto	Altura
Cámara de arco de Q1	150 mm
Altura de Q1	255 mm
Espacio de transición Q1–KM1	100 mm
Altura de KM1	91 mm
Espacio de cableado KM1–U1	100 mm
Distancia X1 (superior de U1)	100 mm
Altura de U1	546 mm
Distancia X2 (inferior de U1)	100 mm
Total	1442 mm

Añadiendo un margen adicional de 80 mm para prensaestopas, terminales y tolerancia constructiva, la altura interior requerida asciende a aproximadamente 1522 mm.

Se selecciona el gabinete de piso PanelSeT SFN, NSYSFN20650P de Schneider Electric 2000×600×500 mm, IP55, el cual se presenta en la Figura 24 para reconocer su diseño estructural y de acceso frontal como candidato porque cubre con margen suficiente la altura interior mínima requerida, 1522 mm, dentro de una dimensión comercial estándar de fabricación, sin incurrir en un sobredimensionamiento.

Figura 24

PanelSeT SFN NSYSFN20650P



Con el candidato seleccionado, se verifica el cumplimiento de los requerimientos calculados frente a los datos reales de fabricación reportados en la ficha técnica del NSYSFN20650P mediante la Tabla 23

Comparativa de los requerimientos calculados frente al Gabinete NSYSFN20650Pque sirve como una matriz de comparación técnica, demostrando de manera cuantitativa que el gabinete supera con holgura cada especificación de diseño y asegurar que aguantará con total seguridad las exigencias mecánicas, térmicas y ambientales.

Tabla 23

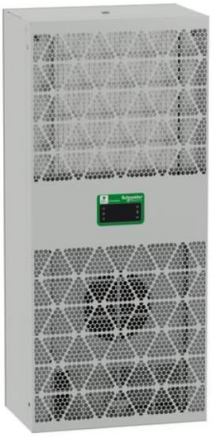
Comparativa de los requerimientos calculados frente al Gabinete NSYSFN20650P

Parámetro	Requerimiento calculado	Gabinete NSYSFN20650P
Altura interior mínima	1522 mm	2000 mm
Ancho mínimo	165 mm	600 mm
Profundidad mínima	232 mm	500 mm
Grado de protección	IP54	IP55
Capacidad de carga	Soporte mínimo 13.8 kg incluyendo los accesorios	Formato de piso, peso propio del gabinete 91.9 kg

Se seleccionó un sistema de refrigeración activa para garantizar las condiciones térmicas óptimas de operación y salvaguardar la vida útil de los componentes electrónicos de control alojados en el gabinete modular PanelSet SFN NSYSFN20650P, el cual se ilustra en la Figura 25 para identificar el aspecto externo y el formato de montaje debido a que dadas las limitaciones de espacio en la instalación, se escogió una solución que se monta directamente sobre la puerta.

Figura 25

ClimaSys CU NSYCU800DG



En la Tabla 24 se exponen las especificaciones técnicas principales y el criterio de compatibilidad con el gabinete del sistema seleccionado de Schneider Electric, referencia activa NSYCU800DG de la gama ClimaSys CU.

Tabla 24

Especificaciones y criterios de selección del climatizador NSYCU800DG

Parámetro Técnico	Climatizador NSYCU800DG	Criterio de Compatibilidad e Integración
Montaje y Ubicación	Conexión lateral	Instalación en la puerta del gabinete
Potencia de Enfriamiento	800 W	Seguridad térmica para variadores y PLC.
Alimentación Eléctrica	230 V	Conexión directa a la red de control disponible en el panel, lo que nos evita instalar transformadores o fuentes de voltaje adicionales
Dimensiones Físicas	780 mm x 345 mm x 215 mm	Encaja sin problema en el ancho útil de la puerta (600 mm), respetando los límites metálicos del tablero sin sobresalir de la estructura.
Grado de Protección	IP55	Sella los componentes electrónicos aislando el circuito interno del ambiente industrial, respetando la exigencia ambiental.
Control y Comunicación	Termostato electrónico con pantalla táctil y Modbus RTU	Permite el monitoreo digital local de alarmas.

Pruebas experimentales

Una vez validada la integración del Variador de Frecuencia (VDF) y la respectiva acometida eléctrica trifásica, se procedió a la caracterización física del sistema. Utilizando la instrumentación Pitot anclada a los ductos, se llevó a cabo el registro de las velocidades de flujo correspondientes a distintos regímenes del motor. El objetivo consistió en determinar empíricamente la curva de respuesta de la velocidad del aire en la sección de admisión frente a la modulación de la frecuencia del motor. Para evaluar la sensibilidad del sistema, se ejecutó un barrido de frecuencias operativas desde 40 Hz hasta 70 Hz con el motor existente en la planta.

Tabla 25

Velocidad del flujo de aire en la entrada del ciclón en función de la frecuencia del VDF.

Frecuencia del VDF (Hz)	Velocidad del Flujo de Aire (m/s)
40	8.83
50	12.30
60	15.30
65	17.70
70	17.90

El análisis de los resultados evidencia que, a partir de los 65 Hz, se produce un estancamiento en la capacidad de extracción del ventilador, saturando el incremento de velocidad en aproximadamente 17.9 m/s. Por otro lado, se verificó que operar el equipo a 60 Hz incrementa significativamente la velocidad base, pasando de 12.3 m/s a 15.3 m/s. Si bien el modelo analítico establece una velocidad teórica requerida de 20.84 m/s, se determinó por limitaciones del motor instalado establecer la configuración operativa del VDF a 60 Hz. Obligar al motor a trabajar de forma continua por encima de la frecuencia nominal de su placa dispara la demanda de par. Llevar al motor a soportar este nivel de esfuerzo mecánico continuo tiene una consecuencia directa, el sobrecalentamiento de los devanados. Forzar el equipo a trabajar bajo estas condiciones desemboca inevitablemente en una falla térmica prematura. Permitir que esto ocurra significaría paralizar por completo la producción en la línea de pintura y, lo que es más grave, poner en riesgo la seguridad de toda la instalación.

Análisis de datos

Una vez terminada la instalación y con la velocidad del motor ya ajustada, dejamos que el equipo trabajara con normalidad durante una semana de operación continua. Transcurrido ese tiempo, fuimos a extraer las muestras directamente del depósito de desechos para comprobar si la intervención realmente había funcionado. La caracterización granulométrica se lo realizo utilizando microscopía óptica en el Laboratorio de Reología de la Universidad de las

Fuerzas Armadas ESPE. Inicialmente, a través de las micrografías obtenidas y sus respectivas escalas de referencia, se determinó el tamaño de las partículas de forma manual. Sin embargo, contar y medir cientos de partículas a ojo resultó ser un cuello de botella logístico y susceptible a errores de apreciación. La medición manual era lenta y propensa a equivocaciones. Para resolver ese cuello de botella y lograr procesar un mayor volumen de muestras, desarrollamos el algoritmo de visión artificial. Al delegar esta tarea de conteo y medición al software, logramos agilizar el tiempo de análisis y, sobre todo, eliminamos el margen de error humano, dándole al estudio una base estadística mucho más robusta.

Como paso indispensable para que nuestra comparativa fuera válida en la práctica, aplicamos un protocolo de muestreo físico muy estricto dentro de la planta. Nos cercioramos de sacar el polvo exactamente desde el punto central del depósito de rechazo, cuidando de replicar las mismas condiciones de recolección tanto en la fase previa como en la fase posterior a la repotenciación del ciclón.

Implementación de visión artificial

Para la determinación automatizada del diámetro de las partículas, se desarrolló un algoritmo de visión artificial utilizando el lenguaje de programación Python (versión 3.14). La arquitectura del código se dividió según su función: recurrimos a *OpenCV* para ejecutar el procesamiento morfológico de las imágenes, mientras que utilizamos *NumPy* y Pandas para estructurar y analizar matemáticamente los arreglos de datos generados Para asegurarnos de que el software estuviera identificando bien el material, integramos también la biblioteca PIL (*Pillow*). Esta herramienta nos sirvió para superponer visualmente los contornos detectados justo encima de las micrografías originales. Tener esta referencia gráfica en pantalla fue un paso clave para calibrar la detección de los bordes. Si no hacíamos este ajuste, corríamos el riesgo de generar errores por sobre-segmentación (es decir, que el código fragmente una sola partícula en varios pedazos) o por sub-segmentación (cuando el software agrupa masas pegadas y las cuenta como si fueran un solo cuerpo).

En cuanto a la lógica de cálculo, estructuramos el modelo matemático del código asumiendo geométricamente que todo el material particulado posee una morfología esférica. Bajo esta premisa, el algoritmo toma el área proyectada de cada partícula en píxeles, calcula su diámetro equivalente y aplica un factor de escala para convertir ese valor a micrómetros. Con esta dimensión real, el programa estima el volumen individual. Cuantificar este volumen no es un simple paso matemático, es el indicador central del proyecto, ya que nos revela exactamente qué porcentaje de pintura útil (materia prima) se está desperdiciando en el depósito de rechazo.

Las fórmulas para determinar el diámetro y el volumen a partir del área son las siguientes:

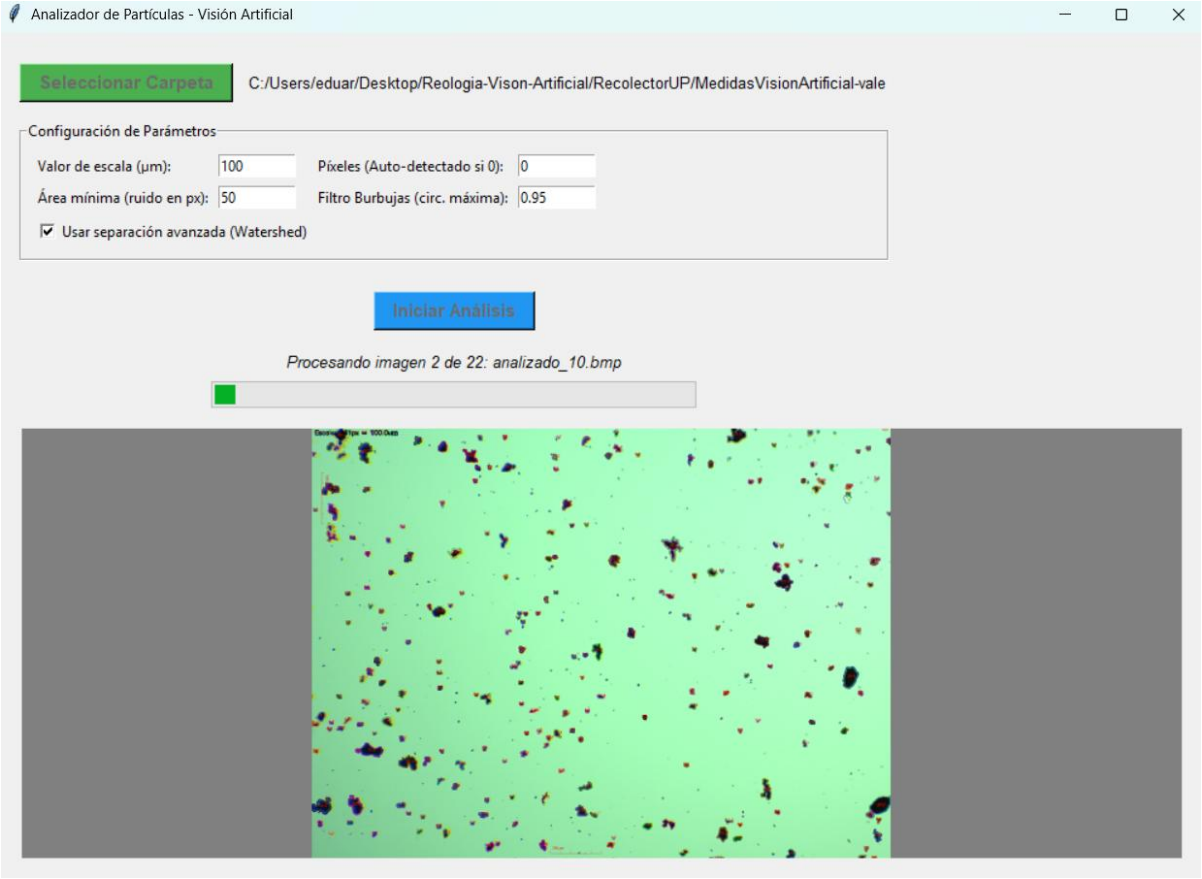
$$D = \sqrt{\frac{4\,A}{\pi}}$$

$$V = \frac{3}{4}\pi\left(\frac{D}{2}\right)^{3}$$

Para facilitar la operación del sistema, se diseñó una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) mediante la biblioteca *Tkinter*. Esta interfaz permite la parametrización dinámica de variables clave, tales como: el directorio de origen, el factor de escala, el área mínima de detección y un filtro de circularidad para discriminar burbujas o artefactos visuales. Además, integra un panel de previsualización que permite validar la calidad de la segmentación en tiempo real antes de procesar el lote completo de imágenes.

Figura 26

Interfaz gráfica de usuario (GUI) desarrollada para la parametrización y análisis granulométrico



Como resultado del análisis por lotes, el software genera automáticamente dos archivos en formato Excel El primero incluye el resumen estadístico global (conteo total, promedios, máximos/mínimos, cuartiles volumétricos y volumen total acumulado), mientras que el segundo conserva el registro individual de cada medición para procesamiento posterior en software de análisis matemático (MATLAB). Como valor agregado para facilitar el análisis, programamos el código para que ensamble automáticamente un reporte en formato PDF usando la librería *ReportLab*. La idea de esto es tener toda la información consolidada tras el procesamiento: el archivo guarda los datos generales de cada lote analizado, traza los histogramas (tanto de cantidad de partículas como de su volumen) y arma una tabla de frecuencias dividida en rangos de 10 μm. En esa tabla detallamos exactamente el conteo, los porcentajes y cuánto volumen se

va acumulando en cada salto. Un ejemplo visual de cómo el software entrega este documento final se muestra en la Figura 27.

Figura 27

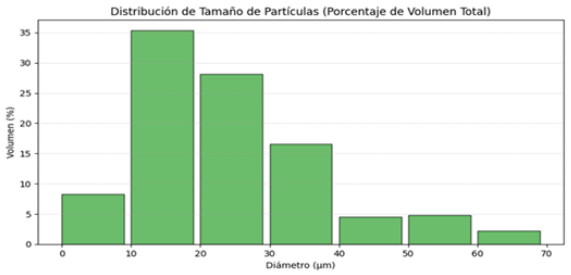
Ilustración del reporte estadístico que se genera automáticamente en formato PDF.

Particle Size Analysis Report (Volume Weighted)

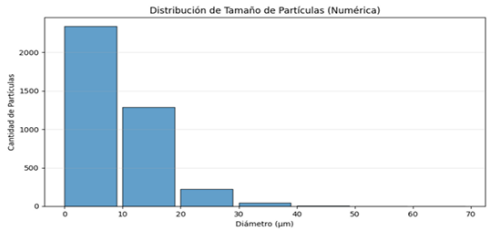
Carpeta Analizada: RecolectorUP
Total Partículas: 3903
Promedio (Numérico): 10.42 um
Rango: 4.41 - 61.46 um
Volumen Total Calculado: 5.42e+06 um³

D10 (um)	D50 (um)	D90 (um)
10.60	21.45	41.06

Particle size distribution (Volume %)



Particle size distribution (Numerical)



Distribution Table (Numeric and Volume)

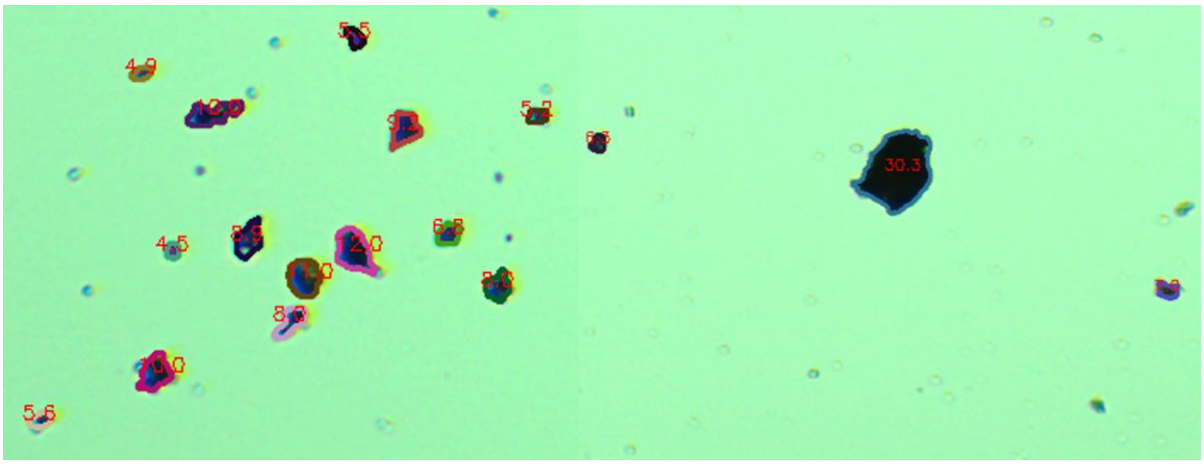
Diam um	Cant	Num %	Vol %	Cum Vol %
0 - 10	2336	59.85	8.32	8.32
10 - 20	1289	33.03	35.34	43.66
20 - 30	222	5.69	28.18	71.84
30 - 40	46	1.18	16.6	88.44
40 - 50	6	0.15	4.5	92.95
50 - 60	3	0.08	4.81	97.76
60 - 70	1	0.03	2.24	100.0

Una vez calibrado el algoritmo, logramos que el software segmentara y delimitara con precisión el contorno real de cada partícula de pintura. Al inspeccionar visualmente las micrografías procesadas, comprobamos que los filtros de circularidad y área mínima cumplían exactamente la función para la que fueron programados: limpiar la imagen. En la práctica, la preparación de las muestras en el fluido portador siempre genera pequeñas burbujas o ruido óptico que el sistema podría interpretar erróneamente como material particulado. Al implementar esta arquitectura de filtrado, logramos discriminar y descartar exitosamente esos

falsos positivos, garantizando que el cálculo granulométrico final estuviera libre de sesgos analíticos como se puede observar en la Figura 28.

Figura 28

Reconocimiento de bordes y etiquetado dimensional en las micrografías de las muestras analizadas



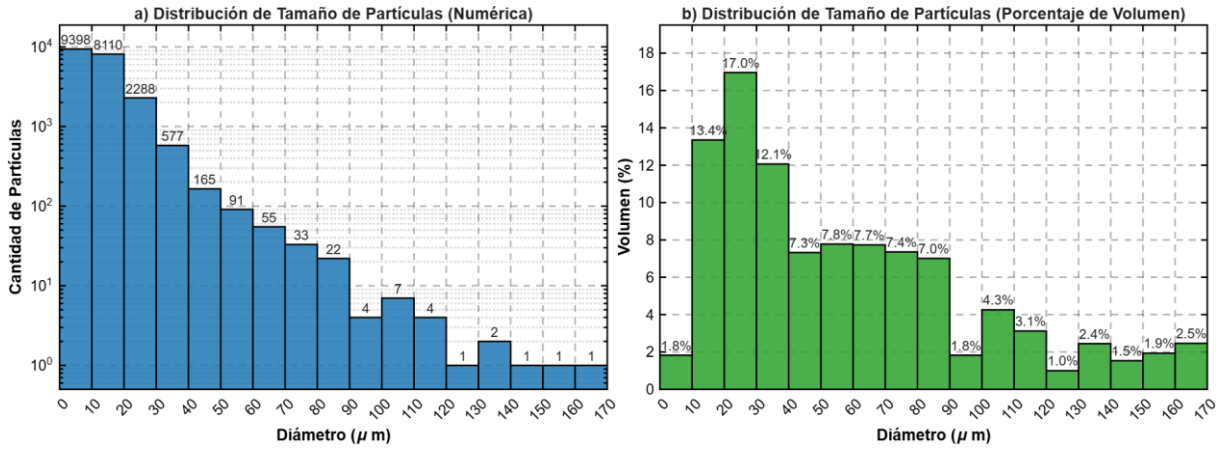
Resultados de la distribución granulométrica

El procesamiento de las imágenes mediante el algoritmo de visión artificial proporcionó los perfiles dimensionales de las muestras extraídas de la pintura nueva y del desecho, tanto antes como después de la modificación de velocidad. Para la representación gráfica, el eje de abscisas agrupa el tamaño de las partículas en intervalos de 10 μm, mientras que el eje de ordenadas indica la frecuencia numérica o el porcentaje del volumen total.

Como línea base, se analizó primero la distribución granulométrica de la pintura nueva (virgen) para tener una referencia del porcentaje que ocupa cada rango establecido. La Figura 29 evidencia que, aunque existe una vasta cantidad numérica de partículas inferiores a 20 μm, estas representan únicamente el 15.18% del volumen total. La mayor concentración volumétrica se localiza en el rango de 20-30 μm (17%), seguida de una distribución homogénea cercana al 7% en los intervalos de 40 a 90 μm. Cabe destacar que el tamaño máximo detectado en la materia prima se situó en el rango de 160-170 μm.

Figura 29

Distribución granulométrica de la pintura nueva: a) frecuencia numérica de partículas y b) volumen porcentual

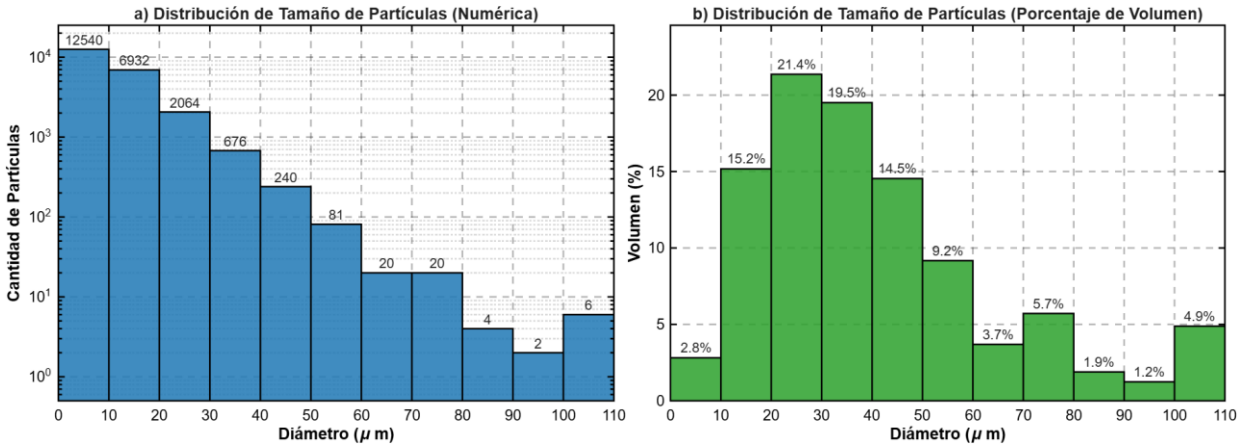


Previo a la repotenciación, la distribución granulométrica en el depósito de desecho evidenció la tendencia ilustrada en la Figura 30. Al igual que en la pintura nueva, se observa una alta frecuencia numérica de partículas de tamaño reducido. Pero contar la cantidad de partículas por sí solo no basta, para evaluar el rendimiento real del equipo, tuvimos que fijarnos en la fracción volumétrica, es decir, cuánto espacio ocupaba realmente ese material. Al procesar las muestras con el algoritmo, nos dimos de frente con la falla principal de toda la línea de recuperación, el polvo fino y verdaderamente inservible (menor a 20 μm) correspondía a un bajísimo 17.99% de todo el volumen detectado. Llevado a la realidad económica de la fábrica, el dato es alarmante: el 82.01% del material que el ciclón tiraba al depósito de rechazo era pintura en excelentes condiciones para seguir recubriendo piezas. Aunque notamos un ligero aumento en la captura de finos respecto a la base de la pintura nueva (del 15.18% al 17.99%), el nivel de arrastre de material pesado evidenció la ineficiencia aerodinámica del diseño original. El flujo estaba arrastrando pintura desperdiciada en rangos excesivamente grandes, registrando partículas de hasta 100-110 μm (con un 4.2% del volumen). Peor aún, las bandas granulométricas de 20-30 μm, 30-40 μm y 40-50 μm concentraron casi la mitad de la masa volumétrica total (21.4%, 19.5% y 14.5% respectivamente). En la práctica, estos altos

porcentajes en los rangos intermedios y gruesos demuestran una pérdida de materia prima inaceptable, ya que todo este material debería estar reinyectándose directamente a la línea de producción.

Figura 30

Caracterización granulométrica del desecho (pre-intervención): a) frecuencia numérica de partículas y b) volumen porcentual



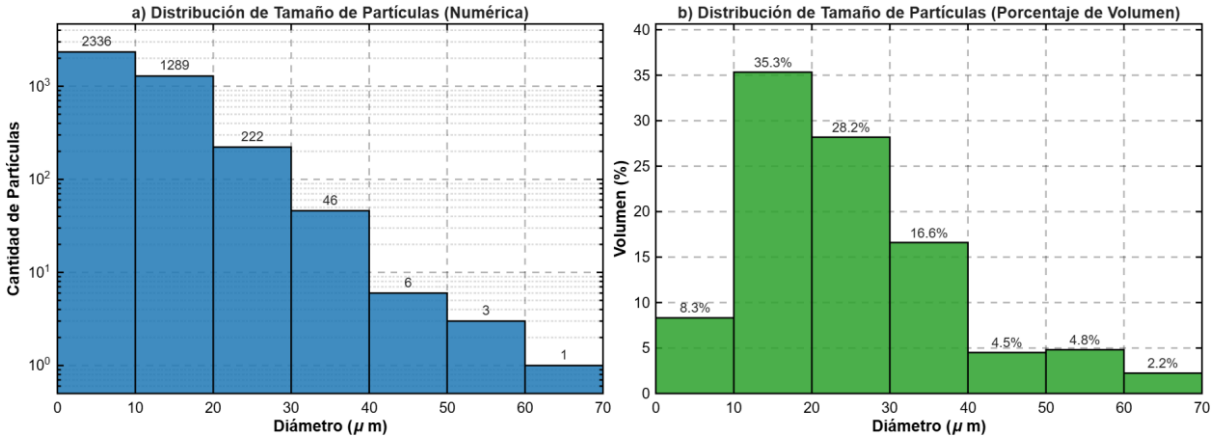
Tras la implementación de las mejoras operativas, se obtuvo la distribución granulométrica ilustrada en la Figura 31. Como la frecuencia poblacional cuantitativa tiene un comportamiento similar al de los gráficos anteriores, se hará el análisis sobre la distribución porcentual volumétrica. Lo más importante es que el tamaño máximo de partícula arrastrada al desecho se redujo significativamente, quedando entre el rango de 60-70 μm. Además, al comparar con el desecho previo a la intervención, la fracción de partículas menores a 20 μm experimentó un incremento considerable, pasando del 17.99% al 43.66% del volumen total, lo que reduce la proporción de volumen útil atrapado erróneamente al 56.34%.

Al desglosar las bandas volumétricas, notamos que la mayor ocupación en el rechazo se concentra ahora entre los 10-20 μm (representando un 35.3%). Sin embargo, también documentamos una retención del 28.2% en el intervalo de 20-30 μm. Aunque teóricamente este valor excede nuestro diámetro crítico de 20 μm, a nivel industrial esto constituye un claro acierto operativo. Si estas partículas de transición, que son extremadamente finas, reingresaran

al sistema, generarían defectos superficiales en el acabado y sobresaturarían la línea de producción con nubes de polvo excesivas. La separación aerodinámica real se rige por curvas de eficiencia fraccional estadística y no por cortes dimensionales perfectos. Por ende, capturar y purgar esta fracción intermedia resulta altamente beneficioso para la calidad del recubrimiento. Con este equilibrio dinámico, la pérdida neta de pintura verdaderamente aprovechable se mitigó a tan solo un 28.1%.

Figura 31

Caracterización granulométrica del desecho (post-intervención): a) frecuencia numérica de partículas y b) volumen porcentual

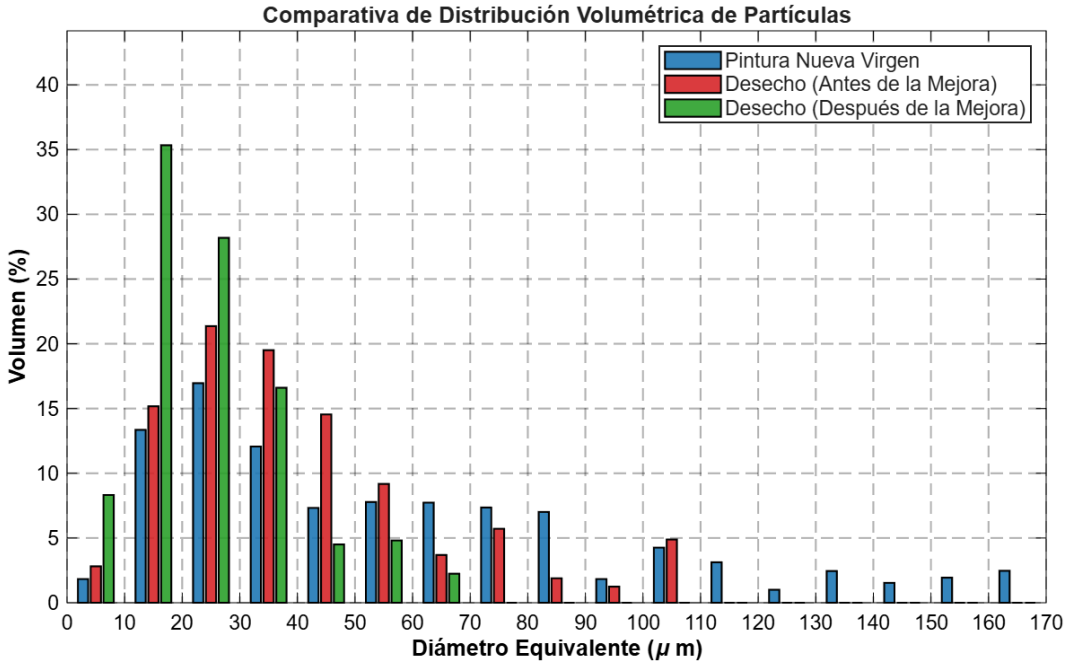


Para consolidar el análisis de resultados, la Figura 32 presenta la superposición de los porcentajes de distribución volumétrica correspondientes a las tres fases de muestreo. Esta representación facilita el contraste directo de la eficiencia de separación del equipo. Al procesar los datos y visualizar el histograma se puede evidenciar un efecto muy claro, en las bandas menores a 30 μm (y sobre todo en las partículas más finas, por debajo de los 20 μm), la cantidad de polvo atrapado en el desecho creció de forma notoria tras la optimización. Por el contrario, a medida que revisamos los tamaños más grandes, vemos que la curva de volumen cae en comparación a cómo operaba el equipo originalmente. En términos prácticos, esto nos confirma que el ciclón dejó de arrastrar el material útil hacia la basura. Resulta imperativo aclarar que la discrepancia porcentual en la fracciónes entre el desecho y la pintura virgen

responde a la distribución de masa base de esta última: la materia prima está compuesta mayoritariamente por particulas de mayor calibre, una característica de diseño indispensable para asegurar un acabado superficial de alta calidad industrial.

Figura 32

Comparativa de la distribución granulométrica volumétrica entre la pintura virgen y el desecho (pre y post intervención)



Además, el análisis de los percentiles volumétricos corrobora cuantitativamente el éxito de la intervención. Una vez que ajustamos la velocidad del motor, el tamaño general del material desechado se encogió, confirmando lo esperado por los cálculos numéricos. El cambio más fuerte lo notamos al revisar el percentil D_{90} (el valor que agrupa al 90% del volumen de polvo de la muestra). En este punto, logramos que el diámetro del polvo fugitivo caiga en 33.73 μm. Por su parte, la mediana de toda la distribución (D_{50}) también bajó hasta quedarse estable en los 21.45 μm, acompañada de una reducción de 5.05 μm en el percentil inferior (D_{10}). La caída de estos dos indicadores de corte nos entrega una prueba matemática y concluyente, la repotenciación del separador ciclónico cumplió estrictamente con su propósito operativo.

Tabla 26

Comparativa de los percentiles volumétricos antes y después de la repotenciación.

Parámetro	Sin Mejoras (12.3 m/s) [μm]	Con Mejoras (15.3 m/s) [μm]	Variación [μm]
D10	15.65	10.60	-5.05
D50 (Mediana)	35.32	21.45	-13.87
D90	74.79	41.06	-33.73

Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

La evaluación virtual del comportamiento del flujo gas-sólido demostró que el control de los gradientes de presión y perfiles de velocidad permite gobernar la trayectoria de evacuación de las partículas. Al comprobar la respuesta del equipo ante regímenes cinemáticos de 12 m/s hasta 25 m/s, se logró identificar los parámetros ideales para maximizar la selectividad centrífuga, validando que el incremento de la energía cinética en la admisión es la variable clave para optimizar la eficiencia de captura.

Al evaluar el equipo presente en la planta, logramos evaluar su estado real de operación y cuantificar el déficit de velocidad aerodinámica que arrastraba el separador ciclónico. Tras trazar la curva de respuesta del motor al variar su frecuencia, comprobamos que el flujo de admisión todavía tenía un margen de mejora importante. Por esta razón, decidimos intervenir el sistema de extracción para frenar de una vez el arrastre prematuro de pintura útil. El ajuste nos permitió elevar la velocidad aerodinámica de forma segura, saltando de los 12.3 m/s originales a un régimen optimizado de 15.3 m/s.

Lo más destacable de este resultado es que aumentamos la capacidad de retención del ciclón sin recurrir a una intervención mecánica invasiva. Bastó con aprovechar la regulación electrónica para llevar el motor hasta su límite nominal seguro de 60 Hz. Así, conservamos la integridad del sistema de ventilación y evitamos detener la línea de producción de la fábrica.

La cuantificación del espectro granulométrico del material rechazado demostró de forma contundente el desplazamiento del diámetro de corte del ciclón. La fracción volumétrica de polvo fino no útil (< 20 µm) purgada en el depósito de rechazo aumentó significativamente desde el 18.0 % hasta el 43.6 %. El incremento neto del 25,6%, evidencia la evacuación efectiva de partículas que, por error, se reincorporaban al ciclo. En paralelo, el diámetro máximo de partícula arrastrada al desecho sufrió una contracción drástica, disminuyendo desde

el rango de 100-110 µm hasta el intervalo de 60-70 µm, lo que ratifica que las partículas de mayor calibre son ahora retenidas y recirculadas eficientemente.

Esta reconfiguración del espectro granulométrico dio como resultado una disminución de la mediana de la distribución de 35.32 µm a 21.45 µm. Aunque la logística empresarial no permitió confinar el desecho únicamente a la fracción <20 µm, la reducción del límite superior de arrastre y la concentración del material descartado en los rangos de 10-20 µm y 20-30 µm (este último aumentando del 19.5% al 28.2%) confirman la optimización. Este filtrado selectivo es operativamente conveniente, ya que evita que las partículas ultrafinas se acumulen en la fase productiva, cuyo reciclado comprometería la calidad del acabado superficial y saturarían la cabina de aplicación con nubes de polvo suspendido.

Como balance final, repotenciar el separador trajo consigo beneficios económicos y ambientales que actúan en conjunto. En números, lograr que el polvo fino inútil ocupe ahora un 25.6% adicional en el volumen de desecho tiene una lectura económica muy clara: esa misma cantidad corresponde a las partículas del polvo grueso que la empresa desechaba y que ahora recircula hacia la línea de recubrimiento.

Esto desencadena un impacto ambiental sumamente positivo. Los residuos de pintura en polvo no pueden gestionarse como basura común, exigen un manejo riguroso bajo normativas ambientales estrictas. Al reducir drásticamente la fuga de partículas útiles hacia el rechazo, la empresa necesita menos requerimientos de tratamientos especializados. En la práctica, la fábrica logro una doble reducción de costos empezando con el ahorro directo por aprovechar al máximo la pintura virgen y la disminución en los pagos por confinamiento de residuos peligrosos.

Recomendaciones para futuras mejoras y estudios

Se recomienda evaluar una elevación adicional de la velocidad aerodinámica de inyección cercana a la teórica, siempre que los límites electromecánicos del ventilador lo permitan o plantear el remplazo de estos. El objetivo de este aumento es reducir el diámetro de

corte y obtener una disminución aún mayor en el tamaño medio de las partículas que escapan al depósito de desecho.

Si se desea una mayor eficiencia de separación sin hacer grandes cambios estructurales, se recomienda reducir el diámetro interno del tubo buscador de vórtice. Para mantener una menor invasividad del equipo, esta modificación geométrica puede realizarse incrementando el espesor de pared del ducto existente. De igual forma, se hace necesario subsanar las inconcordancias dimensionales señaladas en el análisis teórico, ya que la literatura académica muestra que estas desviaciones geométricas perjudican el rendimiento.

Se debe ejecutar un monitoreo técnico para valorar el impacto real que tenga el reingreso de partículas en la banda de 20 a 30 µm al sistema de pintura. Es importante determinar si esta granulometría compromete la calidad de acabado superficial o genera una sobresaturación (nube de polvo) perjudicial en el ambiente de cabina.

Propuestas para trabajos futuros

Implementar un protocolo de muestreo al final de cada jornada operativa con el objetivo de escalar el algoritmo de visión artificial desarrollado en Python hacia un sistema de inspección continuo. Mediante la integración de un microscopio digital, el software podría analizar las muestras extraídas y generar alertas automáticas si el diámetro de las partículas excede los límites de control. Esta herramienta estadística permitiría evaluar constantemente la calidad del polvo y determinar si es necesario reajustar los parámetros operativos del separador en función de la formulación específica o de los distintos proveedores de pintura.

Cuantificar la carga electrostática remanente con la que la pintura ingresa al separador ciclónico. La obtención empírica de este dato permitiría desarrollar una simulación más robusta en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) que integre la interacción triboeléctrica a la resolución aerodinámica. Considerando que la pintura en polvo se aplica mediante procesos electrostáticos, investigar cómo la carga eléctrica afecta las trayectorias o la tendencia de

adherencia en la pared interna de las partículas más finas (< 20 µm) representaría una nueva y valiosa frontera de optimización para el equipo.

Referencias

Ariyaratne, W. K. H., Manjula, E. V. P. J., Ratnayake, C., & Melaaen, M. C. (2018). *CFD Approaches for Modeling Gas-Solids Multiphase Flows - A Review*. 680–686. https://doi.org/10.3384/ecp17142680

Eliezer, Z., Schulz, C. J., & Barlow, J. W. (1978). Friction and wear properties of an epoxy-steel system. *Wear*, *46*(2), 397–403. https://doi.org/10.1016/0043-1648(78)90043-1

Fassani, F. L., & Goldstein, L. (2000). A study of the effect of high inlet solids loading on a cyclone separator pressure drop and collection efficiency. *Powder Technology*, *107*(1–2), 60–65. https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00091-1

González Santander Martínez, J. Luis., & Castellano Estornell, Gloria. (2000). *Fundamentos de mecánica de fluidos*. 522.

Koçak, E. (2026). System-Level Prediction and Optimization of Cyclone Separator Performance Using a Hybrid CFD–DEM–ANN Approach. *Applied Sciences 2026, Vol. 16, Page 1621*, *16*(3), 1621. https://doi.org/10.3390/APP16031621

Marinack, M. C., Musgrave, R. E., & Higgs, C. F. (2013). Experimental Investigations on the Coefficient of Restitution of Single Particles. *Tribology Transactions*, *56*(4), 572–580. https://doi.org/10.1080/10402004.2012.748233

Masoud, D., & Shahidzadeh, M. S. (2011). A CFD study of the effect of vortex finder thickness on gas cyclone separator performance. *Journal of Applied Sciences*, *11*(14), 2570–2577. https://doi.org/10.3923/JAS.2011.2570.2577

Miller, B. G. (2017). Particulate Formation and Control Technologies. *Clean Coal Engineering Technology*, 419–465. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811365-3.00008-9

Odintsov, S. D., Pandey, S., & Singh Brar, L. (2023). *Academic Editors: Rahmat Ellahi The Impact of Increasing the Length of the Conical Segment on Cyclone Performance Using Large-Eddy Simulation*. https://doi.org/10.3390/sym15030682

Oranje, J. R. J. M. (2021). *Optimisation of the Separation Efficiency of a Cyclone Separator using CFD*.

Shastri, R., & Brar, L. S. (2020). Numerical investigations of the flow-field inside cyclone separators with different cylinder-to-cone ratios using large-eddy simulation. *Separation and Purification Technology*, *249*, 117149. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117149

Vermande Paganel, T., Fabrice Alban, E., Cyrille, M. A., & Ngayihi Abbe, C. V. (2024). CFD Simulation of an Industrial Dust Cyclone Separator: A Comparison with Empirical Models: The Influence of the Inlet Velocity and the Particle Size on Performance Factors in Situation of High Concentration of Particles. *Journal of Engineering*, *2024*(1). https://doi.org/10.1155/2024/5590437

Wang, B. (2009). *Modelling the multiphase flow in cyclones*. https://doi.org/10.26190/UNSWORKS/23806

Wang, C., Ma, Y., & Sui, W. (2023). The Secondary Flows in a Cyclone Separator: A Review. *Processes*, *11*(10), 2935. https://doi.org/10.3390/pr11102935

Wei, Q., Sun, G., & Yang, J. (2019). A model for prediction of maximum-efficiency inlet velocity in a gas-solid cyclone separator. *Chemical Engineering Science*, *204*, 287–297. https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.03.054

Yang, J., Sun, G., & Zhan, M. (2015). Prediction of the maximum-efficiency inlet velocity in cyclones. *Powder Technology*, *286*, 124–131. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.07.024

Zhang, Y., Lan, X., & Gao, J. (2012). Modeling of gas-solid flow in a CFB riser based on computational particle fluid dynamics. *Petroleum Science*, *9*(4), 535–543. https://doi.org/10.1007/s12182-012-0240-7

Apéndices